

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Optimalizované spínání
The Optimized Switching

2018

Reder Zdeněk

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Zdeněk Reder

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Optimalizované spínání
The Optimized Switching

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor spínání silových elektrických obvodů
3. Popište princip optimalizovaného spínání s využitím systému synchroswitch
4. Uveďte příklady z praxe
5. Posuďte výhody a nevýhody synchronizovaného spínání
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje, Praha, 1985, SNTL
- HAVELKA, Otto. Stavba elektrických přístrojů I., Brno, 1984, VUT Brno
- BULL, B.K.: Elektrické přístroje, SNTL Praha, 1978
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

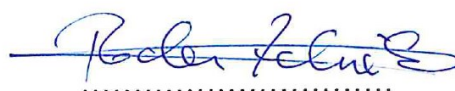


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V **Havířově** dne: 14.4.2018

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "Robert Zelinka", is written over a horizontal dotted line.

podpis autora

Abstrakt

Práce se zabývá teorií spínání, čili zapínáním a vypínáním v uzemněné, nebo neuzemněné soustavě. Zabývá se optimalizací řízeného spínání pomocí zařízení Switchsync PWC600. Dále řeší konkrétní výstupy ze zařízení Switchsync PWC600 jednotlivých spínání kompenzačních tlumivek v terciárech transformátorů a vyhodnocuje jejich jednotlivé průběhy. Tato práce dává rychlý a stručný přehled o technicky složitém zařízení tak, aby bylo přístupné pro provozní pracovníky a pro každého, kdo o toto téma projeví zájem.

Klíčová slova

Vypínač; Přechodové jevy; Řízené spínání; Spínání v uzemněné soustavě; Spínání v izolované soustavě; Spínací operace; Optimalizace; Řízené spínání; Kompenzace; Kompenzační tlumivky; Monitorování vypínače; Elektrické funkce vypínače; Mechanické funkce vypínače.

Abstract

This work's main focus is in switching theory, which is switching on and off in grounded or in ungrounded systems. It is concerned with controlled switching optimization using Switchsync PWC600 controller. It also deals with Switchsync PWC600 outputs while measuring switching on characteristics of single reactors located in transformer's tertiary windings. This work sums up this technically complicated device into quick and brief overview so it could be readily available for technicians or anyone who would express his interest in such matter.

Keywords

Switch; Transient; Controlled switching; Switching in grounded system; Switching in isolated system; Switching operation; Optimization; Compensation; Shunt reactors; Switch monitoring; Electrical functions of a switch; Mechanical functions of a switch.

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování této bakalářské práce

V Havířově dne: 14.4.2018



.....
podpis autora

Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Úvod.....	12
1 Spínání obvodů.....	13
1.1 Terminologie.....	13
1.1.1 Přechodové jevy	13
1.1.2 Elektrický výboj.....	13
1.1.3 Elektrický střídavý oblouk	14
1.1.4 Zotavené napětí	15
1.2 Spínání třífázového obvodu-současně.....	16
1.3 Spínání třífázového obvodu-nesoučasně.....	17
1.4 Vypnutí třífázového obvodu	18
1.5 Spínání třífázové soustavy v uzemněné síti	19
1.5.1 Vypnutí	19
1.5.2 Zapnutí	20
1.6 Spínání třífázové soustavy v neuzemněné (izolované) síti	21
1.6.1 Vypnutí	21
1.6.2 Zapnutí	22
2 Aplikace a optimalizace, řízeného spínání	23
2.1 Popis jednotky Switchsync PWC 600 (Synchroswitch)	23
2.2 Typy spínaných zátěží pomocí Switchsync PWC600.....	24
2.2.1 Kompenzační kondenzátorové baterie	24
2.2.2 Výkonové transformátory	24
2.2.3 Nezatížená přenosová vedení a výkonové kabely	24
2.2.4 Kompenzační tlumivky (shunt reactors)	25
2.3 Spínací operace pomocí Switchsync PWC600	25
2.4 Volba operace, volba vhodné strategie	26
2.4.1 Předdefinované operace (strategie).....	26
2.4.2 Uživatelem definované operace (strategie).....	26
2.5 Optimalizace přesnosti.....	26
2.5.1 Kompenzace parametrů.....	27

2.5.2	Adaptivní korekce	28
2.6	Celková optimalizace	28
2.6.1	Operace zapnutí	28
2.6.2	Operace vypnutí	29
3	Kompenzační tlumivka v aplikaci optimalizace řízeného spínání	31
3.1	Kompenzační tlumivky v přenosové soustavě	31
3.1.1	Kompenzační tlumivky suché (dry type)	31
3.1.2	Kompenzační tlumivky olejové (wet type)	32
3.2	Připojení kompenzační tlumivky ke zdroji napětí	34
3.2.1	Grafický výstup připojení kompenzační tlumivky ke zdroji napětí ze zařízení Switchsync PWC600	35
3.2.2	Monitorování elektrických funkcí vypínače při zapnutí	37
3.2.3	Monitorování mechanických funkcí vypínače při zapnutí	39
3.3	Odpojení kompenzační tlumivky od zdroje napětí	42
3.3.1	Grafický výstup odpojení kompenzační tlumivky od zdroje napětí ze zařízení Switchsync PWC600	44
3.3.2	Monitorování elektrických funkcí vypínače při vypnutí	45
3.3.3	Monitorování mechanických funkcí vypínače při vypnutí	47
3.4	Simulace neúspěšného zapnutí kompenzační tlumivky	52
	Závěr	53

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$L1, U$	označení první fáze
$L2, V$	označení druhé fáze
$L3, W$	označení třetí fáze
U_V	napětí výboje
I_V	proud výboje
u_0	napětí elektrického střídavého oblouku
i_0	proud elektrického střídavého oblouku
U_m	maximální hodnota napětí
u_a	napětí oblouku
U_{zn}, u_{zn}	zotavené napětí
i_U	proud ve fázi U
i_V	proud ve fázi V
i_W	proud ve fázi W
u_{pp}	průrazné poobloukové napětí
u_{kid}	ideální napětí na kontaktech
$U_{kid\ max}$	maximální, ideální napětí na kontaktech
Z_U	Impedance ve fázi U
Z_V	Impedance ve fázi V
Z_W	Impedance ve fázi W
U_f	Fázové napětí
U_s	Sdružené napětí
GOOSE	„Generic Object Oriented Substation Event“ - Generická, objektově orientovaná událost rozvodny
IED	„Intelligent electronic device“ - Inteligentní elektronická jednotka
TA, TP	Přístrojový transformátor proudu
TV, TN	Přístrojový transformátor napětí
Deg	Označení úhlu
NO	Pomocný pracovní kontakt
NC	Pomocný klidový kontakt

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Přehledová charakteristika elektrických výbojů [1]	14
Obr. 2 - Časový průběh napětí a proudu elektrického střídavého oblouku vlevo a jeho dynamická charakteristika vpravo [1]	15
Obr. 3 - Průběh úspěšného uhasnutí oblouku	16
Obr. 4 - Zapnutí všech pólů vypínače současně v třífázovém obvodu [1]	17
Obr. 5 - Zapnutí všech pólů vypínače nesoučasně v třífázovém obvodu [1]	17
Obr. 6 - Průběh poobloukového průrazného a zotaveného napětí při úspěšném vypnutí [1]	18
Obr. 7 - Periodický průběh ideálního zotaveného napětí střídavého obvodu [1]	19
Obr. 8 - Schéma třífázové soustavy s oboustranně uzemněným uzlem [1]	20
Obr. 9 - Průběh proudů při současném sepnutí třífázové soustavy	20
Obr. 10 - Schéma třífázové soustavy s neuzemněným izolovaným uzlem [1]	21
Obr. 11 - Fázorový diagram napětí třífázové neuzemněné sítě [1]	22
Obr. 12 - Průběh proudů při nesoučasném zapnutí třífázové soustavy	22
Obr. 13 - Switchsync PWC600 firmy ABB [5]	23
Obr. 14 - Ideální průběh spínací operace zapnutí [5]	29
Obr. 15 - Definice spínací operace řízeného vypnutí [5]	30
Obr. 16 - Kompenzační tlumivka suchá	32
Obr. 17 - Detail hliníkové nosné konstrukční hvězdice a podpěrných izolátorů suché kompenzační tlumivky	32
Obr. 18 - Třífázová olejová kompenzační tlumivka Siemens	33
Obr. 19 - Grafický výstup průběhů při zapnutí	35
Obr. 20 - Detail průběhů napětí a proudů při zapnutí	37
Obr. 21 - Elektrická chyba operace při zapnutí	38
Obr. 22 - Úhel zapínacího proudu a hoření oblouku	38
Obr. 23 - Mechanický čas pohybu vypínače (dole), Počáteční mechanický čas zpoždění vypínače (uprostřed), Mechanický provozní čas vypínače (nahore)	39
Obr. 24 - Mechanická chyba operace zapnutí	40
Obr. 25 – Detail Obr. 24 - Mechanická chyba operace zapnutí	41
Obr. 26 - Grafický výstup při vypínání	44
Obr. 27 - Detail průběhů napětí a proudů při vypnutí	45
Obr. 28 - Elektrická chyba operace při vypnutí	46
Obr. 29 - Doba hoření oblouku	47

Obr. 30 - Mechanický čas pohybu vypínače (dole), Počáteční mechanický čas zpoždění vypínače (uprostřed), Mechanický provozní čas vypínače (nahore)	48
Obr. 31 - Mechanický čas pohybu vypínače.....	49
Obr. 32 - Počáteční mechanický čas pohybu	49
Obr. 33 - Mechanický provozní čas	50
Obr. 34 - Mechanická chyba operace zapnutí.....	50
Obr. 35 - Grafický výstup neúspěšné operace zapnutí.....	52

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Ukázka kompenzačního vybavení předkonfigurované verze Switchsync PWC600 [5].....	27
Tabulka 2 - Význam parametrů vzorce T_{IC} [5]	28
Tabulka 3 - Legenda k Obr. 14 [5].....	29
Tabulka 4 - Význam (legenda) parametrů vzorce TtO [5]	29
Tabulka 5 : Seznam předdefinovaných strategií pro řízené připojení tří fázových kompenzačních tlumivek ke zdroji napětí [5].....	34
Tabulka 6 - Legenda k Obr. 19 a k Obr. 20	36
Tabulka 7 - Legenda k Obr. 21	38
Tabulka 8 - Legenda k Obr. 22 - Úhel zapínacího proudu a hoření oblouku.....	39
Tabulka 9 - Legenda k Obr. 23	40
Tabulka 10 - Legenda k Obr. 24 - Mechanická chyba operace zapnutí a k Obr. 25 – Detail Obr. 24 - Mechanická chyba operace zapnutí	41
Tabulka 11 - Seznam monitorovaných hodnot při zapnutí	42
Tabulka 12 - Seznam předdefinovaných strategií pro řízené odpojení tří fázových kompenzačních tlumivek od zdroje napětí [5].....	43
Tabulka 13 - Časy hoření oblouku při odpojení kompenzačních tlumivek od zdroje napětí za předpokladu předstihové fáze L1 [5]	43
Tabulka 14 - Legenda k Obr. 25 a k Obr. 26	44
Tabulka 15 - legenda k Obr. 28	46
Tabulka 16 - Legenda k Obr. 29	47
Tabulka 17 - Legenda k Obr. 30	48
Tabulka 18 - Legenda k Obr. 31	49
Tabulka 19 - Legenda k Obr. 32	49
Tabulka 20 - Legenda k Obr. 33	50
Tabulka 21 - Legenda k Obr. 34	51
Tabulka 22 - Seznam monitorovaných hodnot při vypnutí.....	51

ÚVOD

Málokdo si uvědomuje, že spínání elektrických obvodů je nedílnou součástí jak všedního života každého z nás, tak obrovskou starostí drtivé většiny výrobců spínaných prvků, výrobců elektrické energie, distribučních i přenosových soustav, nehledě na dimenzování zařízení. Spínání obvodů, ať už jde o zapínání, či vypínání, je velmi složitý proces, který skýtá mnohá úskalí. Počínaje přechodovými jevy, ustálenými hodnotami napětí i proudů, zotaveným napětím a podobně, je téma spínání, popřípadě optimalizace řízeného spínání velmi důležitým tématem.

V přenosové soustavě České republiky, čili v síti 400kV a 220kV, vznikla potřeba kompenzace sítě. Tato práce je zaměřena na spínání právě kompenzačních tlumivek v terciérech transformátorů 400/121/10,5kV, které jsou v přenosové soustavě použity jako (de)kompenzační prostředky s hodnotou jalového výkonu 45MVAr pro tuto kompenzaci. Přenosová soustava nyní vynakládá velké prostředky na rozvoj těchto kompenzačních zařízení, a proto tady vzniká otázka, proč vznikla vůbec potřeba optimalizovat řízené spínání kompenzačních tlumivek. Je to jen celosvětový „boom“, nebo jde opravdu o podstatnou a potřebnou věc?

Smyslem této práce je blíže přiblížit problematiku samotné optimalizace řízeného spínání, optimalizace řízeného spínání kompenzačních tlumivek přenosové soustavy pomocí zařízení Switchsync PWC600 od firmy ABB a jeho technologie. Díky použití tohoto zařízení má dojít k zjednodušení a částečnému či kompletnímu řešení událostí při spínání elektrického zařízení, smyslem bude i vysvětlit, co bylo důvodem k instalaci tohoto zařízení a v čem spočívá možná budoucnost samotné optimalizace řízeného spínání či kompenzace přenosové soustavy.

1 SPÍNÁNÍ OBVODŮ

Z hlediska spínání obvodů bereme v úvahu dvě změny stavu. V prvním případě jde o zapínání elektrického proudu a v druhém případě o vypínání elektrického proudu daného obvodu. Při vypínání i zapínání elektrického proudu dochází v obvodu ke vzniku přechodových jevů. Přechodové jevy jsou důsledkem vzájemného působení mezi obvodem a vypínačem. [1]

1.1 Terminologie

1.1.1 Přechodové jevy

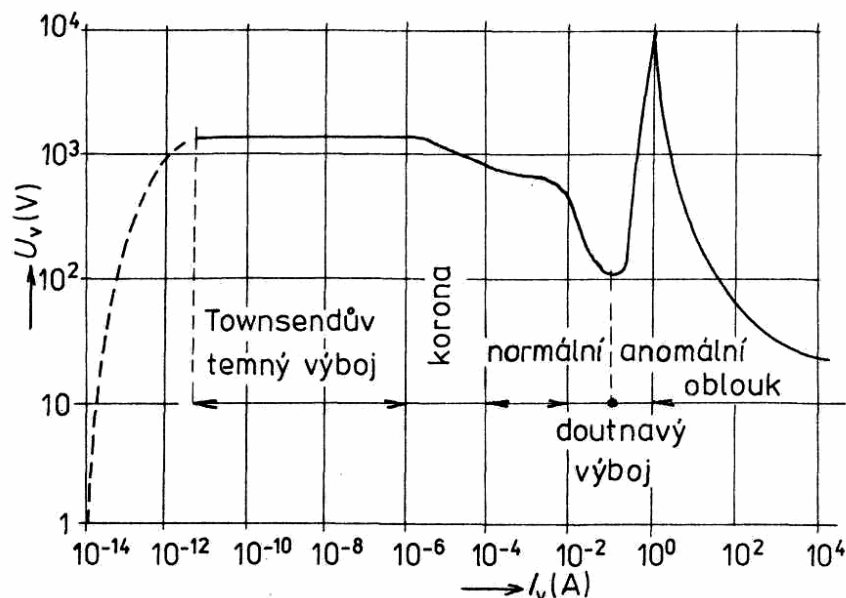
Každý skutečný elektrický obvod není jednoduše řečeno nic jiného, než jisté pospojování rezistorů, induktorů a kapacitorů, jejichž rozložení je uvažováno po celém obvodu. Rozložení parametrů může být rozdílné a závisí na konečných vlastnostech obvodu a charakterech přechodových jevů. V obvodu máme proudové i napěťové přechodové jevy a podle parametrů, které mají na tyto přechodové jevy nejpodstatnější vliv, rozdělujeme obvody na indukční, kapacitní a odporové. Samozřejmostí je, ať už jde o obvody indukční, kapacitní nebo odporové, že se nachází v obvodu všechny tři zmíněné složky.[1,2]

Podstatný vliv na přechodové jevy má i samotný vypínač. Parametrem vypínače ovlivňující přechodové jevy je přechodový odpor samotného vypínače, který při vypínání narůstá s časem, a to z jisté konečné velikosti na velikost teoreticky až nekonečnou. Tato daná skutečnost je komplikací při výpočtech samotných přechodových jevů, a proto dochází k idealizaci vypínače. U vypínače si idealizujeme tři vlastnosti. První vlastností je, že vypínač má nulový odpor v zapnutém stavu. Druhou idealizovanou vlastností je nekonečná velikost odporu vypínače při vypnutém stavu a třetí idealizovanou vlastností je zapnutí a vypnutí vypínače, které proběhne za dobu $T=0$, čili bez jakékoliv prodlevy.[1,2]

1.1.2 Elektrický výboj

Co se týče elektrického výboje, jde o fyzikální jev, kdy se izolant stává vodičem elektrického proudu vlivem různých tepelných procesů, odehrávající se v izolantu samotném. Pro samotný průchod proudu v libovolném prostředí je potřeba do tohoto prostředí přivést elektricky nabitě částice, nebo je v něm vytvořit. Elektricky nabitě částice tvoří u kovových vodičů volné elektrony, které uvádí do pohybu zdroj. Takže vedení proudu je zprostředkováno pomocí elektronů i za předpokladu, kdy se elektronová vodivost mění v iontovou vodivost. Pro vznik elektrických výbojů je potřeba mít na elektrodách napětí. Podle hodnoty napětí a hlavně hodnoty velikosti proudu specifikujeme dále elektrické výboje na [1] :

- Townsendův temný výboj
 - Korónový výboj
 - Doutnavý výboj
 - Jiskrový výboj
 - Obloukový výboj
- , které jsou zobrazeny na Obr. 1 [1]



Obr. 1 - Přehledová charakteristika elektrických výbojů [1]

Z výše uvedeného Obr. 1 je zcela patrné, že základními parametry, určujícími vlastnosti elektrického oblouku je napětí na elektrodách a proud procházející dráhou výboje. Dále to je tvar elektrod, materiál elektrod, chemické složení plazmatu, způsob chlazení plazmatu, elementární jevy probíhající v dráze výboje a tlak v dráze výboje. Všechny tyto parametry jsou na sobě závislé, to znamená, že následkem změny jednoho parametru je změna ostatních parametrů.[1]

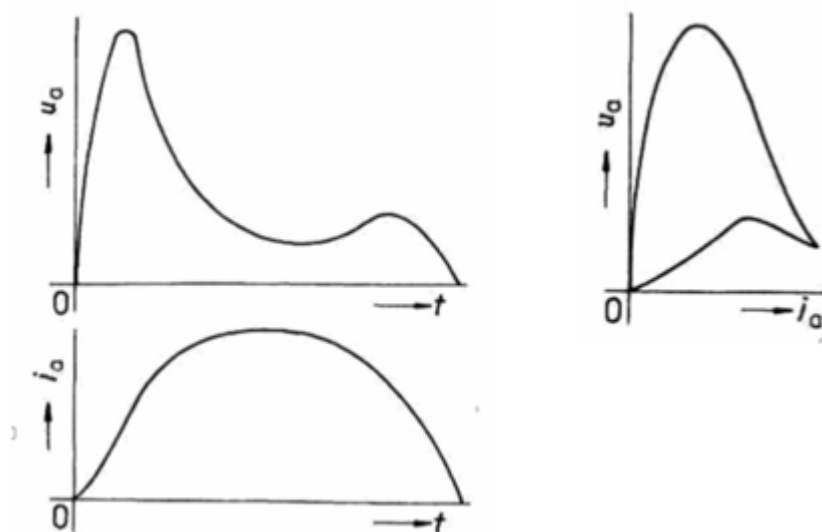
1.1.3 Elektrický střídavý oblouk

Elektrický oblouk je druh elektrického výboje hořícího v plynu, který má válcovitý tvar a jehož jádro je tvořeno plazmou (ionizovaným plynem). Hodnota proudové hustoty elektrického oblouku se udává 3000 A/cm^2 a teplota jádra $(7 - 15) \cdot 10^3 \text{ K}$. [1,3]

Elektrický střídavý oblouk je proměnný v čase a jeho průběh je znázorněn dynamickou charakteristikou (Obr. 2), která popisuje poměry v hořícím výboji, obvodu střídavého proudu. Dále popisuje závislost napětí a proudu obloukem procházejícím. [1,2]

Na začátku půlperiody stoupá napětí na elektrodách souhlasně se síťovým napětím až do napětí potřebného pro zapálení oblouku, nazýváme jej zapalovacím napětím. Po zapálení oblouku, napětí poklesne na hořící napětí oblouku a po určitou část periody se mění velmi málo. Po dobu, kdy oblouk hoří, se mění proud. Znázorněním jeho časového průběhu je mírně deformovaná sinusovka. Na konci půlperiody se napětí nepatrně zvýší, maximální hodnotu zvýšeného napětí

nazýváme zhášecí špička. V oblasti zhášecí špičky se proud procházející obloukem blíží k nulové velikosti. [1]



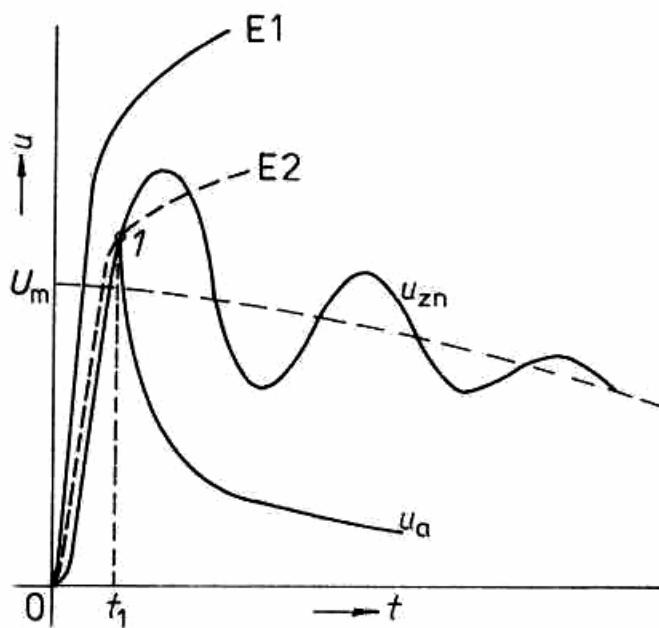
Obr. 2 - Časový průběh napětí a proudu elektrického střídavého oblouku vlevo a jeho dynamická charakteristika vpravo [1]

1.1.4 Zotavené napětí

Zotavené napětí je napětí mezi kontakty po uhašení elektrického oblouku, čili ihned po přerušení proudu.[7]

Časový průběh zotaveného napětí je superpozicí obnoveného napětí a přechodné složky zotaveného napětí. Obnovené napětí je složka z_n o provozním kmitočtu sítě, jeho velikost odpovídá okamžité hodnotě ustáleného provozního napětí, které by v místě uvažovaného vypínacího pólu existovalo mezi jeho kontakty ve vypnutém stavu, za jinak stejných podmínek zapojení sítě z hlediska vypínání.[4]

Společně s elektrickou pevností je hodnota zotaveného napětí nejdůležitějším parametrem při vypínání obvodu a hlavně následného zhášení střídavého elektrického oblouku. Jednoduše řečeno, nutnou podmínkou úspěšného vypnutí je větší růst elektrické pevnosti než růst hodnoty zotaveného napětí. Tuto podmínku a její průběh znázorňuje Obr. 3. [7]



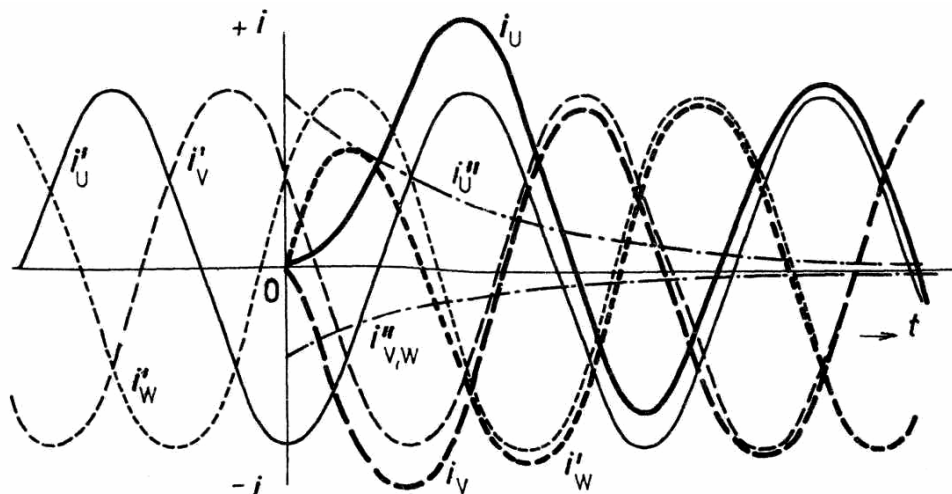
Obr. 3 - Průběh úspěšného uhasnutí oblouku

Na Obr. 3 je patrné, že pro úspěšné uhašení oblouku, musí mít časový průběh elektrické pevnosti (křivka E1) větší velikost, než je velikost časového průběhu zotaveného napětí (křivka u_{zn}). Pokud ovšem časový průběh elektrické pevnosti bude mít nedostatečnou velikost (křivka E2), celý vypínací proces selže a oblouk se znovu vytvoří. Důsledkem již neexistujícího zotaveného napětí, se na elektrodách objeví napětí oblouku u_a . Nový oblouk hoří opět do dalšího průchodu proudu nulou a následně se celý proces opakuje, a to do doby, kdy převládnu deionizační procesy nad ionizačními a vzrůst elektrické pevnosti je dostatečný, například tak, jak tomu bylo v prvním případě s křivkou E1. [1,2,7]

1.2 Spínání třífázového obvodu-současně

Při současném spínání třífázového obvodu vypínačem v jednotlivých fázích, za předpokladu konstantních parametrů, můžeme zapínací proces v třífázové soustavě brát jako spínání tří na sobě nezávislých obvodů. Hodnota všech napětí jednotlivých fází je stejná, avšak posunutá o úhel 120° . Protože počáteční velikost přechodných složek jednotlivých fází není stejná, tak ani jednotlivé průběhy přechodných složek nemohou být stejné. Pokud ovšem jsou samostatné fáze mezi sebou stejně zatíženy, bude ve všech jednotlivých fázích stejná ustálená složka proudu posunutá o úhel φ vzhledem k napětí.[1]

Grafické zobrazení jednotlivých průběhů a výsledných složek přechodového proudu při třífázovém současném sepnutí kontaktů je na Obr. 4.

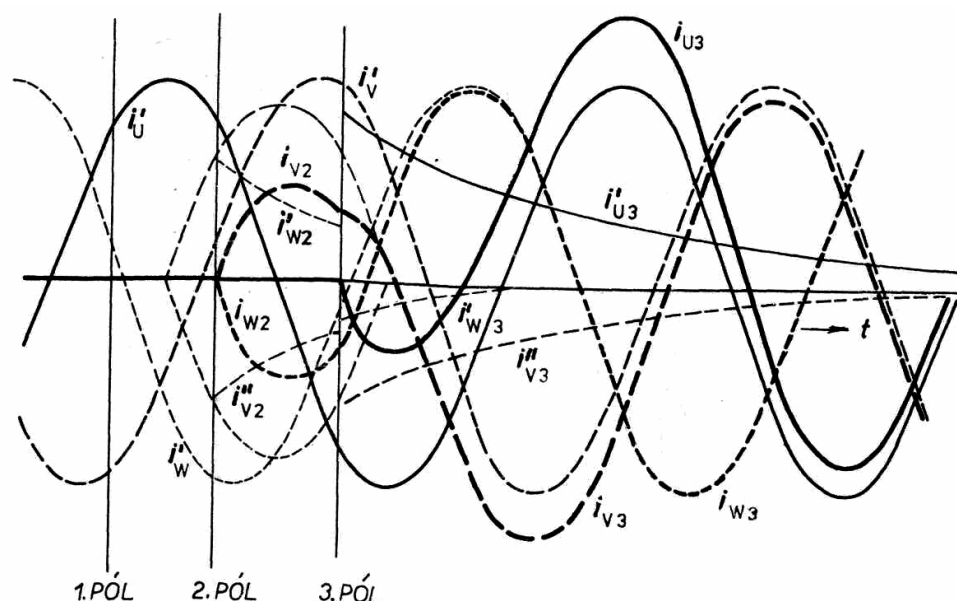


Obr. 4 - Zapnutí všech pólů vypínače současně v třífázovém obvodu [1]

1.3 Spínání třífázového obvodu-nesoučasně

Dalším druhem spínání je spínání jednotlivých fází obvodu nesoučasně. Jsou-li jednotlivé fáze spínány nesoučasně, je celý průběh zcela jiný. Při zapnutí první fáze se spíná bez proudu a v podstatě se nic neděje. Zapnutím druhé fáze a tím i zátěže do obvodu se objeví sdružené napětí. Amplituda ustáleného proudu druhé spínané fáze je menší, než ustálená hodnota proudu při současném sepnutí fází. Třetí fáze spíná logicky jako poslední. Sepnutím třetí fáze se uskuteční konečné třífázové zapnutí celé soustavy, kdy nastane zcela nový přechodový jev ve všech fázích obvodu, protože konečná ustálená složka proudu musí být posunutá o stejný úhel φ vzhledem k napětí a ustálená složka napětí, časově posunutá o 120° ($2/3 \pi$). Poslední spínaná fáze spíná za stejných podmínek, jako tomu je u současněho spínání všech tří pólů.[1]

Grafické zobrazení jednotlivých průběhů a výsledných složek přechodového proudu při třífázovém nesoučasném sepnutí kontaktů je na Obr. 5.



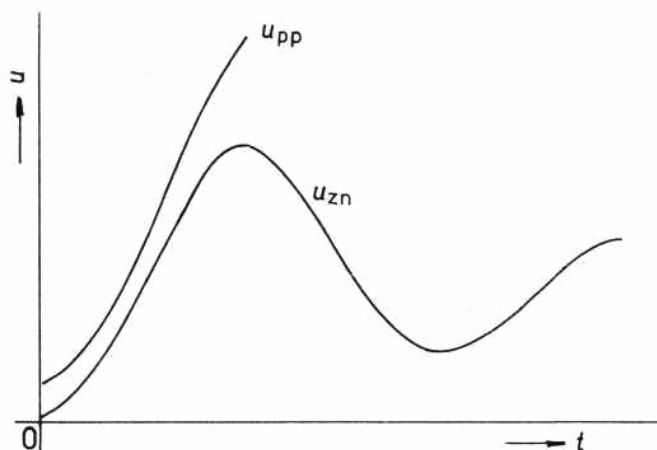
Obr. 5 - Zapnutí všech pólů vypínače nesoučasně v třífázovém obvodu [1]

1.4 Vypnutí třífázového obvodu

Jeden z mnoha činitelů, který ovlivňuje průběh vypínacího procesu je zotavené napětí. Zotavené napětí a zvětšování elektrické pevnosti při vypínání jsou děje, které se navzájem v každém okamžiku vypínacího procesu ovlivňují. Zotavené napětí je určeno napětím zdroje, parametry sítě (kapacitou, činným odporem, indukci), jejich rozdělením v síti a hlavně zbytkovou vodivostí prostředí, ve kterém jsou obě elektrody přístroje. Změna velikosti zbytkové vodivosti prostředí je časově závislá na použitém zhašecím médiu vypínače. Z důvodu, že nejsme schopni zjistit zbytkovou vodivost prostředí ani časový průběh, tak si vypínač idealizujeme.

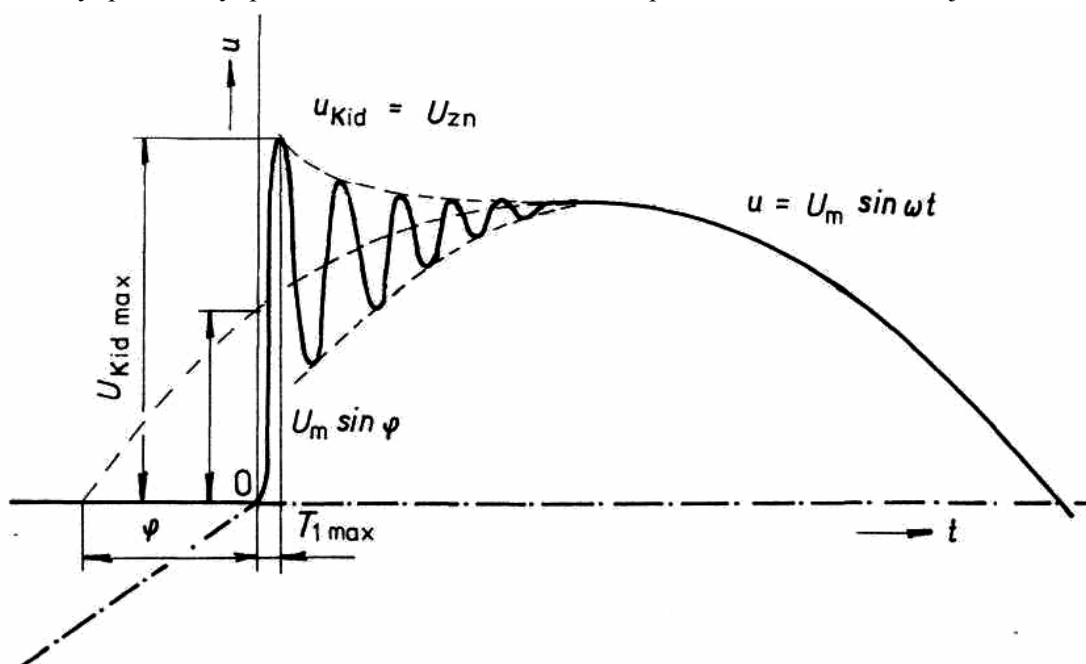
Předpokladem ideálního vypínače tedy bude nulová zbytková vodivost po průchodu proudem nulou a velikost napětí do průchodu proudem nulou bude také nulová.[1]

Při vypnutí střídavého obvodu se zotavené napětí u_{zn} , skládá ze dvou složek. První je obnovené napětí U_{ob} , které charakterizuje úhlová frekvence ω a jde v podstatě o napětí zdroje. Druhá je přechodná složka zotaveného napětí, která má harmonický průběh s frekvencí ω_{id} , avšak ta se časem tlumí. Po zániku oblouku musí být zotavené napětí u_{zn} menší, než hodnota průrazného po obloukového napětí u_{pp} . [1] To je graficky znázorněno na Obr. 6.



Obr. 6 - Průběh poobloukového průrazného a zotaveného napětí při úspěšném vypnutí [1]

Samotný periodický průběh ideálního zotaveného napětí střídavého obvodu je na Obr. 7.



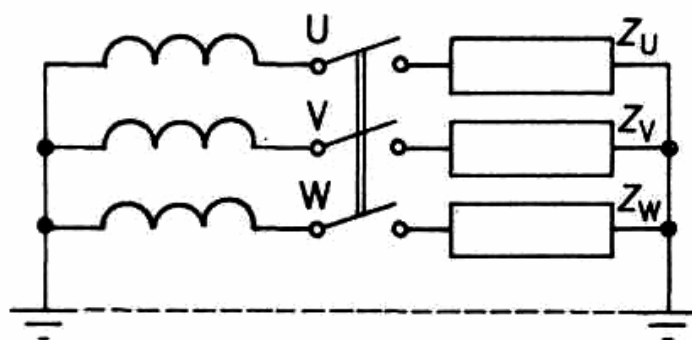
Obr. 7 - Periodický průběh ideálního zotaveného napětí střídavého obvodu [1]

1.5 Spínání třífázové soustavy v uzemněné síti

1.5.1 Vypnutí

Naprostá většina energetických rozvodů a převážná část rozvodů průmyslových jsou provedeny jako třífázové soustavy s různým spojením. V případě soustavy s oboustranně uzemněným uzlem, nebo se zpětným vodičem, mezi fázovými vodiči neexistuje žádná vazba. V tomto případě, kdy mezi jednotlivými fázemi neexistuje žádná vazba, se při vypínání budou chovat naprosto nezávisle. V podstatě jde o vypínání tří samostatných jednofázových obvodů.

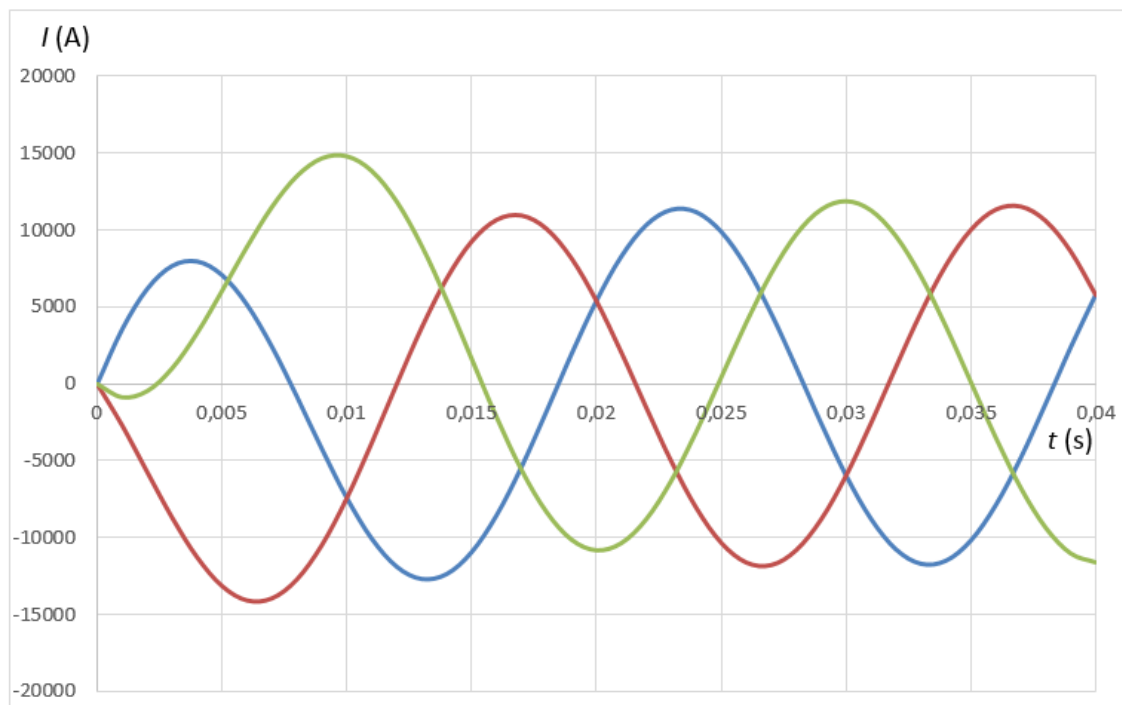
V každé fázi, počáteční obnovené napětí je rovno velikosti fázového napětí zdroje v okamžiku uhasnutí oblouku. Velmi důležitým faktem, který si je potřeba uvědomit, že v každé fázi proud prochází nulou v jiném okamžiku, a proto i zánik oblouku bude v jednotlivých fázích nesouměrný. U třífázového vypínače sice může nastat oddálení kontaktů a zapálení oblouku ve stejném okamžiku, ale k přerušení proudu dojde po průchodu proudu nulou v jednotlivých fázích postupně, přesně tak, jak po sobě následují v odstupu 120° elektrických. Jen pro zajímavost, v našich sítích s kmitočtem 50Hz jde o odstup mezi jednotlivými fázemi 6,66ms.[1,2]



Obr. 8 - Schéma třífázové soustavy s oboustranně uzemněným uzlem [1]

1.5.2 Zapnutí

Stejně jako v případě vypnutí, kdy mezi fázovými vodiči neexistuje žádná vazba, neexistuje mezi nimi žádná vazba ani při spínání třífázové soustavy v uzemněné síti a to za předpokladu, že sepnou všechny tři fáze ve stejném okamžiku. Z tohoto opět plyne, že jde o spínání tří samostatných jednofázových obvodů, kdy je napětí všech fází stejné a vzájemně posunuto o 120° . Protože v jednotlivých fázích jsou stejné i hodnoty odporů a indukčností, bude stejně velká i hodnota ustálené složky proudů jednotlivých fází, při jmenovitém napětí sítě. Ustálená složka proudů je posunutá ve všech fázích o úhel φ oproti napětí. Ukázka možného výsledného průběhu proudů při zapínání třífázové soustavy je na Obr. 9.



Obr. 9 - Průběh proudů při současném sepnutí třífázové soustavy

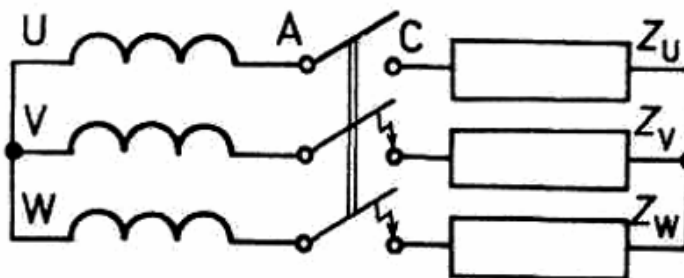
1.6 Spínání třífázové soustavy v neuzemněné (izolované) síti

1.6.1 Vypnutí

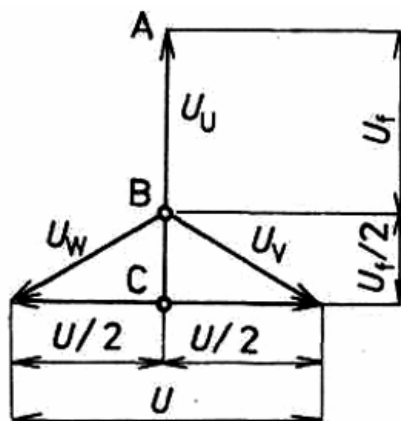
Za předpokladu, kdy není uzel na straně zátěže uzemněn, nebo jde-li o soustavu zcela neuzemněnou, proběhne i za předpokladu nesouměrného zatížení sítě vypínací pochod zcela odlišně. Opět, tak jako v soustavě s uzemněným uzlem, nedojde k přerušení oblouku současně. Tím ale podobnost obou soustav končí. U třífázové soustavy neuzemněné sítě, kdy logicky jde o soustavu bez zpětného vodiče, po uhasnutí oblouku v jedné fázi se soustava rozpadne na soustavu dvoufázovou.

Celý vypínací proces nejlépe vystihuje fázorový diagram na Obr. 11. Před vypnutím je napětí mezi jednotlivými fázemi posunuto standardně o 120° a je souměrné. Z důvodu souměrnosti má nulový bod nulový potenciál. V případě, kdy uhasne oblouk nejdříve například ve fázi U, vytvoří se jediný proudový obvod mezi fázemi V a W, ve kterém působí sdružené napětí těchto fází. Vedením prochází stejný proud, který má fáze V a má opačný směr oproti proudu ve fázi W. Tím je splněna podmínka uzavřené soustavy, kdy součet proudů v každém okamžiku, musí být roven nule. Současně se nulový bod nutně musí přesunout z polohy B do nové polohy C. Přesunem nulového bodu do polohy C se rozdíl potenciálů koncového bodu A fázoru napětí U proti uzlovému bodu zvýší a tento rozdíl se promítne do jednotlivých kontaktů fáze U. Výsledkem, bude skutečnost, že obloukové napětí mezi kontakty fáze U, v níž uhasíná oblouk nejdříve, je 1,5 násobkem velikosti fázového napětí. Protože obvodem ve zbylých dvou fázích prochází stejný proud jako v třífázové soustavě, uhasíná v těchto zbylých dvou fázích oblouk současně a to zhruba za 5ms po zániku oblouku ve fázi U, protože napětí ve fázích V a W jsou v tento okamžik posunuty oproti fázi U jen o 90° . [1]

Pólem, který vypíná první v třífázové neuzemněné síti, nemusí být pouze a jen fáze U, ale kterákoliv jiná. Z tohoto důvodu musí být každý pól třípólového vypínače schopen vypnout jakýkoliv proud a to až do výše jmenovitého vypínacího proudu při 1,5 násobku obnoveného napětí oproti fázovému napětí sítě. Prakticky tomuto požadavku musí vyhovět každý třífázový vypínač, protože nelze rozlišovat vypínače pro uzemněné a neuzemněné sítě. [1]



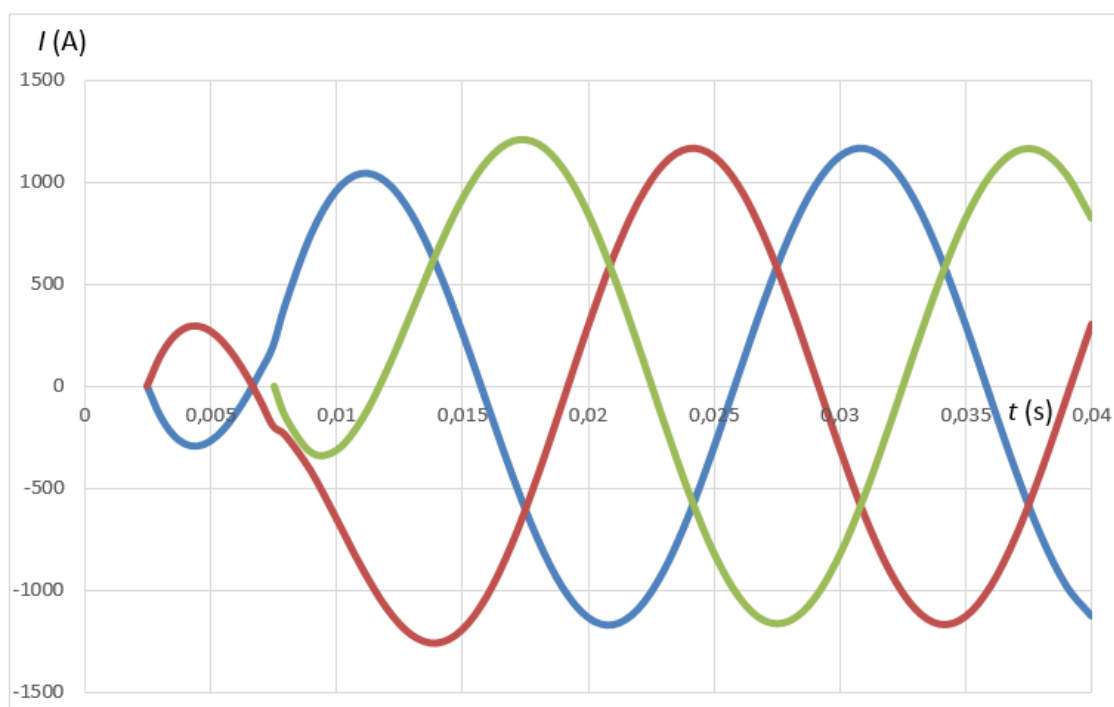
Obr. 10 - Schéma třífázové soustavy s neuzemněným izolovaným uzlem [1]



Obr. 11 - Fázorový diagram napětí třífázové neuzemněné sítě [1]

1.6.2 Zapnutí

Proces zapnutí, kdy není uzel na straně zátěže uzemněn, nebo jde-li o soustavu zcela neuzemněnou, proběhne recipročně oproti vypnutí stejné soustavy. Jednodušeji řečeno, při sepnutí první fáze se v podstatě nic neděje, protože jde o izolovanou soustavu a proudová dráha se nemá jak uzavřít. Při sepnutí fáze druhé se uzavře proudový obvod a mezi fázemi působí sdružené napětí. Proud obvodu se rozdělí na zapnuté dvě fáze, přičemž je roven celkovému proudu zátěže, čímž se splní podmínka uzavřené soustavy, protože součet proudů v každém okamžiku je nulový. V okamžiku sepnutí první a druhé fáze je napětí obou fází posunuto o 90° . Při sepnutí poslední třetí fáze, bude mít nulový bod, nulový potenciál, což znamená, že napětí mezi jednotlivými fázemi se opět standardně posune o 120° mezi fázemi a je souměrné. Proud soustavy se rozdělí na všechny tři fáze a opět splňuje podmínku uzavřené soustavy. Názorná ukázka zapnutí třífázové soustavy neuzemněné, izolované sítě je na Obr. 12. [1]



Obr. 12 - Průběh proudů při nesoučasném zapnutí třífázové soustavy

2 APLIKACE A OPTIMALIZACE, ŘÍZENÉHO SPÍNÁNÍ

2.1 Popis jednotky Switchsync PWC 600 (Synchroswitch)



Obr. 13 - Switchsync PWC600 firmy ABB [5]

Switchsync PWC 600, neboli obecněji používaný název synchroswitch je řídicí jednotka, která slouží k určení bodu na sinusové vlně signálu pro vysokonapěťové vypínače. Základní úlohou této jednotky je ovládat spínání vypínače takovým způsobem, aby k nárůstu proudu při zapínání, či k přerušení proudů při vypínání, docházelo při takovém fázovém úhlu, který bude minimalizovat namáhání vypínače i spínané zátěže. Řízené spínání zajištěné pomocí synchroswitche je použito hlavně z důvodu minimalizace nebezpečných, nežádoucích a škodlivých přechodných jevů, při plánovaném spínání zátěže ke zdroji napětí při zapínání a od zdroje napětí při vypínání. Spínání je prováděno zapínacími popř. vypínacími povely vypínače. Tyto plánované a cílené povely, které nejsou kritické (nejsou vybaveny ochranou), jsou vedeny přes řídicí jednotku synchroswitche. Jednotka vyhodnotí situaci a pošle jednotlivé spínací impulzy na jednotlivé fáze vypínače, kdy bere v úvahu konfiguraci, typ spínané zátěže, zapojení spínané zátěže a mimo jiné i výsledky předešlých spínání. Po úspěšném ukončení celé této operace řízeného spínání od nebo ke zdroji napětí, jednotka porovná skutečný čas spínaných fází vypínače s plánovaným časem sepnutí. Když vezmeme v potaz, že po vyslání spínacího impulsu nějakou dobu trvá, než impuls dorazí, další časová ztráta je na mechanismu vypínače, přímý vliv na čas sepnutí má venkovní teplota, tlak a jiné, je potřeba o tento ztrátový časový interval poslat impuls dříve. Po ukončení spínacího impulsu jednotka vyhodnocuje, zdali byl tento vypočtený časový interval vzhledem k výsledku splněn. Případně provede redukci a optimalizaci odhadnutých provozních časů vypínače před dalším spínáním. V podstatě jde o to, v jakém předstihu musí jednotka vyslat spínací impulzy, aby se minimalizovaly přechodové jevy a nežádoucí účinky na vypínači. Proces porovnání skutečného okamžiku sepnutí a plánovaného okamžiku sepnutí se nazývá „adaptivní korekce“ a systematicky tedy kompenzuje změny provozních charakteristik vypínače.[5]

Z toho plyne, že při zapínání, je ideální spínat zátěž při maximální hodnotě napětí (tím zajistíme nulu proudu) a při vypínání jde o přerušení fázového posunu v nule proudu, čili opět v maximu napětí. Tento úkol se zdá být vcelku jednoduchý, ale musíme brát v úvahu spoustu aspektů ovlivňující tento proces, jímž jsou aspekty v čase nekonstantní. Může jít o hodnotu pomocného napětí, dobu nečinnosti vypínače, teplotu okolí, energii pohonu aj. Tyto aspekty se kompenzují pomocí použití individuálních kompenzačních křivek. Příslušné signály z čidel vypínače ať už interních či externích, jsou připojeny buď k jednotce Switchsync PWC600 přímo, nebo prostřednictvím analogových GOOSE zpráv ze vzdálených zdrojů. [5]

Jednou z mnoha výhod zařízení Switchsync PWC600 je schopnost vypočítávat zbývající životnost vypínače, která se vyjadřuje počtem zbývajících operací. Další schopností tohoto zařízení je výpočet opotřebení elektrické zhášecí komory vypínače, což znamená například vyhodnocení odpaření materiálů opalovacích kontaktů nebo erozi trysek.[5]

2.2 Typy spínaných zátěží pomocí Switchsync PWC600

- Kompenzační kondenzátorové baterie
- Výkonové transformátory
- Nezatížená přenosová vedení a výkonové kabely
- Kompenzační tlumivky

2.2.1 Kompenzační kondenzátorové baterie

U kompenzačních kondenzátorových baterií je potřeba řídit zapnutí takovým způsobem, abychom minimalizovali přechodné jevy při připojení kondenzátorových baterií ke zdroji napájení. Jde nám hlavně o napěťové přechodné jevy a zapínací proudy. Z důvodu zlepšení chování zařízení při přerušení proudu, můžeme použít řízené vypínání.[5]

2.2.2 Výkonové transformátory

U výkonových transformátorů je potřeba řídit připojení transformátoru k napájecímu napětí takovým způsobem, abychom minimalizovali zapínací proudy. Minimalizaci zapínacích proudů umožníme řízeným odpojením transformátoru od napětí a to tak, aby bylo možno nastavit model zbytkového magnetického toku, který bereme v úvahu při následujícím připojení ke zdroji napětí.[5]

2.2.3 Nezatížená přenosová vedení a výkonové kabely

U nezatížených přenosových vedení a výkonových kabelů nám jde o řízení zapnutí takovým způsobem, abychom minimalizovalo přepětíové přechodné jevy. Zde je také možné použít řízené vypínání z důvodu zlepšení chování zařízení při přerušení proudu.[5]

2.2.4 Kompenzační tlumivky (shunt reactors)

U kompenzačních tlumivek nám jde v první řadě o řízení odpojení od zdroje napětí takovým způsobem, abychom zajistili přerušení proudu v dané půlperiodě, bez opětovného zapálení oblouku. Řízené spínání (zapínání) kompenzačních tlumivek je také vhodnou a užitečnou volbou k minimalizaci zapínacích proudů. [5]

2.3 Spínací operace pomocí Switchsync PWC600

Při příjmu a aktivaci spínacího povelu jsou jednotkou Synchronswitche vypočteny optimální fázové úhly sepnutí s ohledem na signály referenčního napětí nebo referenčního proudu. Veškeré potřebné informace k sepnutí, jsou zpracovány na základě typu spínané zátěže, zapojením spínané zátěže, konfiguračním řešením a informace o typu spínací operace, přičemž jsou brány v úvahu změny a kolísání provozních časů i změny externích parametrů. [5]

Řízené spínací operace jsou v zařízení Switchsync PWC600 definovány s ohledem na referenční signály. Prvním je referenční signál při připojení zátěže ke zdroji, zde je použito při zapnutí vypínače primární napětí, kdy měřené napětí může být jak jednofázové, tak i třífázové a toto napětí můžeme měřit fázově i sdruženě. Druhým referenčním signálem je referenční signál při odpojení zátěže od zdroje napětí. Zde můžeme použít, buď napětí primárního zdroje napětí, tak jako u zapínání vypínače, nebo při vypínání použijeme proud zátěže. Proud musíme měřit ze všech tří fází. Oba referenční signály mohou být zajištěny přístrojovými transformátory napětí (TV) a proudu (TA). Při nastavení samozřejmě bereme v úvahu i systém sledu fází, zdali je sousledný (L1-L2-L3), nebo zpětný (L1-L3-L2). [5]

Jednotlivé spínací operace, vzhledem k referenčnímu signálu, jsou zadány jako fázové úhly plánovaného okamžiku nárůstu proudu nebo přerušení proudu. V každé fázi je operace sepnutí definována v relativním vztahu k momentu kladného průchodu referenčního signálu nulou.

První fáze pólu vypínače, u které má proběhnout operace spínání jako první, je nazývána fází předstihovou. Pro volbu první spínané fáze, tedy fáze předstihové můžeme využít dvou volitelných alternativ [5] :

- První alternativou je náhodně zvolená fáze – předstihová fáze je vždy zvolena náhodně, smyslem této volby je statisticky rovnoměrné rozdělení elektrického namáhání všech pólů vypínače. [5]
- Druhou alternativou je pevně zvolená fáze L1 – zde je fáze L1 vždy spínána jako první. [5]

U zbylých dvou fází, bez ohledu na volitelnou alternativu předstihové fáze, je průchod referenčního signálu nulou zvolen jako průchod nulou, který následuje po průchodu nulou předstihové fáze. Logicky tedy všechny tři fáze pólu vypínače jsou sepnuty postupně v nule referenčního signálu. Protože u fázových úhlů operace můžeme předpokládat pouze kladné hodnoty, nemůže v okamžiku spínání zbylých dvou fází dojít dříve, než k sepnutí fáze předstihové. [5]

Při odpojení zátěže od zdroje napětí je vypínač řízen takovým způsobem, aby k oddělení hlavních kontaktů vypínače došlo určitou dobu před okamžikem přerušení proudu. Časový rozdíl mezi oddělením kontaktů vypínače a přerušením proudu je doba hoření oblouku. [5]

2.4 Volba operace, volba vhodné strategie

2.4.1 Předdefinované operace (strategie)

Pro běžné řízené spínací aplikace jsou optimální spínací operace předdefinovány v softwaru vybavení jednotky Switchsync PWC600. Tyto přednastavené operace by měly být plně dostačující a měly by vykazovat dobré výsledky. Součástí nastavení těchto přednastavených operací je specifikace typu spínané zátěže, její elektrické zapojení (vektorovou skupinu) a dalších několik parametrů aplikačního řešení. [5]

2.4.2 Uživatelem definované operace (strategie)

U operací se speciálními požadavky, můžeme aplikovat uživatelem definovanou strategii řízeného spínání. Zde je potřeba mimo specifikaci typu spínané zátěže, jejího elektrického zapojení a dalších několika parametrů nastavit i další parametry v programu PCM600. Mezi tyto parametry patří nastavení předstihové fáze (náhodná nebo pevně definovaná), dále parametry sepnutí mechanických kontaktů (Close operations – operace zapnutí), nebo rozepnutí mechanických kontaktů (Open operations – operace vypnutí). [5]

U předstihové fáze je okamžik provedení operace uživatelem specifikován v elektrických stupních s ohledem na relativní vztah k okamžitému kladnému průchodu proudu nulou. U dalších dvou fází je okamžik provedení operace specifikován také v elektrických stupních, ale s ohledem na relativní vztah k okamžitému provedení operace u předstihové fáze. [5]

2.5 Optimalizace přesnosti

Už základním a nejdůležitějším předpokladem úspěšné optimalizace řízeného spínání je znalost klíčových parametrů vypínače. Klíčové parametry vypínače bývají rozdílné jak pro operaci zapnutí, tak pro operaci vypnutí a proto jsou obvykle definovány samostatně. Tyto parametry definují mechanické chování vypínače při jmenovitých provozních podmínkách (časování, přesnost), dielektrické vlastnosti vypínače (rychlost snížení dielektrické pevnosti), dopady externích vlivů na vypínač aj. Mezi dopady externích vlivů patří například vliv stejnosměrného napětí, nebo vliv teploty na provozní časy vypínače (řešení pomocí kompenzačních křivek). Některé z těchto parametrů jsou definovány řešením vypínače a mohou být zjištěny v předstihu, jiné parametry vypínače specifické pro každý pól, jsou diagnostikovány a zjišťovány až v místě instalace zařízení, jako součást před uváděním zařízení do provozu. [5]

Provozní časy spínání vypínače se mohou měnit se změnou určitých parametrů. Jde opět o stárnutí komponentů, teplotu, dobu nečinnosti vypínače od poslední operace a hodnotu stejnosměrného ovládacího napětí. Aby bylo možné provedení řízeného spínání optimalizovat, je Switchsync PWC600 vybaven dvěma funkcemi. Jde o funkce [5] :

- Kompenzace parametrů
- Adaptivní korekce

Na základě dat z těchto dvou funkcí, jsou přizpůsobeny podmínky pro uvolnění vypínače a jeho optimální činnost během operací řízeného spínání.

2.5.1 Kompenzace parametrů

Zařízení Switchsync PWC600 je schopno kompenzovat vliv externích i interních parametrů potřebných k řízenému spínání. Může jmenovitě ovlivnit činnosti změnou hodnoty stejnosměrného ovládacího napětí, dobou nečinnosti vypínače, teplotou, tlakem v pohonu, natažením pružiny pohonu a dalšími uživatelem nadefinovanými parametry. Tato kompenzační funkce využívá individuálních kompenzačních křivek parametrů, které zahrnují parametrické změny oproti požadovaným korekcím provozních stavů vypínače. Operace zapnutí i vypnutí mají k dispozici své rozdílné kompenzační křivky. Hodnoty pro individuální kompenzaci jsou doplněny k celkové kompenzační hodnotě každého pólu vypínače zvlášť. [5]

Switchsync PWC600 od firmy ABB má ve své „knihovně“ kompenzační křivky pro každý svůj typ vypínače, této stejnojmenné firmy, což nám znemožňuje použít ke spínání pomocí tohoto zařízení jiný typ vypínače, než vypínač ABB. Jediné co je potřeba specifikovat, která čidla jsou k jednotce Switchsync PWC600 připojena. Individuální kompenzační křivky můžeme ručně uvolnit, blokovat nebo modifikovat. Signály z čidel, můžeme přijímat buď pomocí analogových GOOSE zpráv, nebo přímo do jednotky Switchsync (IED). Ukázka kompenzačního vybavení u předkonfigurované verze Switchsync PWC600 je v [Tabulka 1](#). [5]

Tabulka 1 - Ukázka kompenzačního vybavení předkonfigurované verze Switchsync PWC600 [5]

Parametr	Čidlo	Množství	Vstup do PWC600
Stejnosemné ovládací napětí	Napětové čidlo	1	Stejnosemné napájení PSM modulu
Doba nečinnosti vypínače	Interní výpočet na bázi stavu proudového signálu, napětového signálu zátěže a/nebo pomocných kontaktů vypínače	3	Vstupy transformátorů proudu (TP) a napětí (TN) na TRM modulu, vzorky proudu a napětí přenášené sběrnici IEC 61850-9-2 nebo binární vstupy na PIO modulu
Nastřádaná energie v pohonu	Sada 1 nebo 2 binárních úrovnových kontaktů	1 nebo 3	Binární vstupy na PIO
Teplota	Teplotní čidlo (např. Pt100) připojené k externí jednotce	1 nebo 3	Analogové GOOSE zprávy
Tlak v pohonu	Tlakové čidlo připojené k externí jednotce sběru dat	1 nebo 3	Analogové GOOSE zprávy
Doplňková veličina č. 1	Čidlo veličiny č.1 připojené k externí jednotce sběru dat	1 nebo 3	Analogové GOOSE zprávy
Doplňková veličina č. 2	Čidlo veličiny č.1 připojené k externí jednotce sběru dat	1 nebo 3	Analogové GOOSE zprávy

Kompenzační hodnoty jsou po každé provedené spínací operaci průběžně aktualizovány. To znamená, že po každé spínací operaci je k dispozici nová aktuální kompenzační hodnota. [5]

2.5.2 Adaptivní korekce

Po každé provedené spínací operaci získá zařízení Switchsync informace o okamžiku, kdy se dané řízené spínání uskutečnilo. Tyto informace čerpá z výsledků analýzy primárních analogových signálů, což je proud a napětí zátěže a také čerpá z časování binárních signálů přivedených z pomocných kontaktů pohonu vypínače.[5]

Údaje naměřené jako skutečné okamžiky provedeného spínání jsou porovnány s předpokládanými údaji operace sepnutí. Na základě rozdílů těchto údajů je použita dílčí část jako korekční hodnota a na základě této korekční hodnoty se aktualizují provozní časy vypínače, které budou použity na další řízené spínání. Celý tento proces je nazýván jako „adaptivní korekce“ hodnot a úkolem tohoto procesu je kompenzovat systematické změny provozních charakteristik vypínače v čase. [5]

2.6 Celková optimalizace

V celkové optimalizaci nás zajímá okamžik doteku označen jako T_t . Jde o okamžik doteku mechanického kontaktu. Celková optimalizace je pro operaci zapnutí (close) i vypnutí (open) vypočtena pomocí rozdílných vztahů. Tyto vztahy nám zahrnují i proces kompenzace parametrů a proces adaptivní korekce.[5]

2.6.1 Operace zapnutí

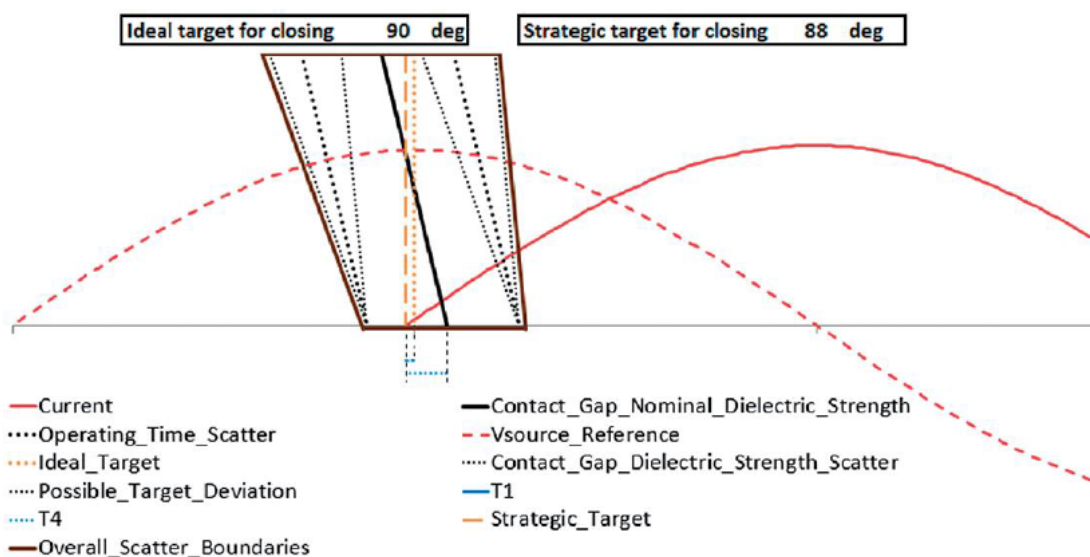
Pro operaci zapnutí (close) je okamžik doteku mechanického kontaktu označován jako T_{tC} . Tento okamžik doteku je vypočten v každé fázi podle následujícího vztahu [5] :

$$T_{tC} = T_0 + T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (5)$$

Tabulka 2 - Význam parametrů vzorce T_{tC} [5]

T_0	ideální okamžik zapnutí
T_1	odchylka od ideálního okamžiku, která zohledňuje dielektrický a mechanický rozptyl
T_2	celková kombinovaná korekční hodnota odvozená z kompenzačních parametrů
T_3	celková kombinovaná korekční hodnota elektrického a/nebo mechanického přizpůsobení
T_4	očekávaná doba před zapálením oblouku

Jako příklad uvedu ideální okamžik spínací operace, kde je nulové napětí na kontaktech vypínače (napětí napříč kontaktu pólu vypínače). Ideální okamžik je nepatrně posunutý vpřed, aby bylo dosaženo nejlepšího možného průběhu operace, ale zase natolik, aby byl znázorněn rozptyl dielektrických a mechanických parametrů. Grafické znázornění příkladu uvádím na Obr. 14 a vysvětlení či legenda je v Tabulka 3.



Obr. 14 - Ideální průběh spínací operace zapnutí [5]

Tabulka 3 - Legenda k Obr. 14 [5]

Legenda k Obr. 3 a Obr. 4:

Ideal target for Closing

Strategic target for closing

Xx deg

Current

Operating_Time_Scatter

Possible_Target_Deviation

Overall_Scatter_Boundaries

Contact_Gap_Nominal_Dielectric_Strenght

Contact_Gap_Dielectric_Strenght

Contact_Gap_Dielectric_Strenght_Scatter

Strategic_Target

Vsource reference

Ideal target

Extended Arcing time due to adaptation

- Ideální okamžik pro zapnutí

- Strategický okamžik pro zapnutí

- Xx stupňů

- Proud

- Rozptyl provozního času

- Možné odchylky operace

- Celkové hranice rozptylu

- Jmenovitá dielektrická pevnost kontaktní vzdálenosti

- Dielektrická pevnost kontaktní vzdálenosti

- Rozptyl dielektrické pevnosti kontaktní vzdálenosti

- Strategie operace

- Referenční napětí zdroje

- Ideální operace

- Prodloužená doba hoření oblouku vyvolaná přizpůsobením (korekcí)

2.6.2 Operace vypnutí

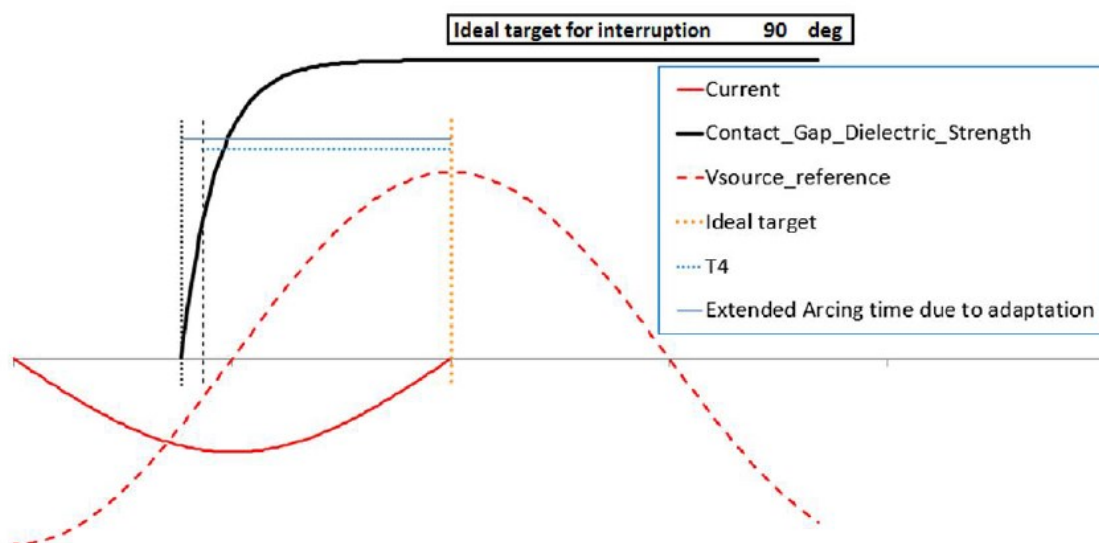
Pro operaci vypnutí (open) je okamžik doteku mechanického kontaktu označován jako T_{t0} . Tento okamžik doteku je vypočten v každé fázi podle následujícího vztahu [5]:

$$T_{t0} = T_0 - T_3 - T_4 \quad (5)$$

Tabulka 4 - Význam (legenda) parametrů vzorce T_{t0} [5]

T_0	ideální okamžik vypnutí (rozepnutí)
T_3	hodnota adaptivní korekce pro dobu hoření oblouku s ohledem na detekci přeskočení nebo opětovného zapálení oblouku
T_4	čas hoření oblouku (doba mezi oddělením mechanického kontaktu a okamžikem přerušení proudu)

V ideální situaci jsou parametry T_3 a T_4 při uvažované operaci vypnutí v místě vrcholu referenčního napětí [5] a jsou zobrazeny na Obr. 15. [5]



Obr. 15 - Definice spínací operace řízeného vypnutí [5]

Význam parametrů je společný s Obr. 14 a je znázorněn v Tabulka 3.

3 KOMPENZAČNÍ TLUMIVKA V APLIKACI OPTIMALIZACE ŘÍZENÉHO SPÍNÁNÍ

Zařízení Switchsync PWC600 je nejčastěji v přenosové soustavě spojováno s kompenzací jalového výkonu pomocí kompenzačních tlumivek terciárů transformátorů 400/121/10,5kV případně 400/220/34kV. Proto se dále zaměřím pouze na vyhodnocení kompenzačních tlumivek, konkrétně na připojení a odpojení kompenzačních tlumivek ke zdroji napětí.

3.1 Kompenzační tlumivky v přenosové soustavě

Paralelně připojené kompenzační tlumivky produkují induktivní jalový výkon, který je potřebný pro kompenzaci nadbytečného kapacitního výkonu. V soustavě pro přenos elektrické energie jsou nepostradatelným prvkem, který nám pomáhá zajistit stabilitu sítě či samotné soustavy. Velikost jalového výkonu, který je potřebný ke kompenzaci sítě, je dána okamžitou velikostí a charakterem připojené zátěže a k řešení tohoto problému nám právě slouží skokové připojování a odpojování kompenzačních tlumivek, čímž kompenzujeme velikost nežádoucího a nadbytečného kapacitního výkonu. Problémem při připojení a odpojení kompenzačních tlumivek jsou již dříve zmiňovány doprovázené proudové a napěťové přechodové děje. Při spínání tlumivek poměrně velkých reaktivních výkonů jsou přechodové děje problémem vcelku markantním a právě k tomuto problému se stavíme použitím optimalizovaného spínání pomocí synchroswitche, což má za úkol chránit jak samotnou kompenzační tlumivku, tak i vypínač, který jí spíná. [6,7]

Základní dva konstrukční typy námi spínaných kompenzačních tlumivek, jsou tlumivky suché a olejové. Nutno podotknout, že spínané zařízení (tlumivky v terciéru transformátorů) pomocí Switchsync PWC600 provádíme v soustavě neuzemněné, čili s izolovaným uzlem.

3.1.1 Kompenzační tlumivky suché (dry type)

Z hlediska konstrukčního uspořádání je v přenosové soustavě nejčastěji používaný typ tlumivek třífázový (tři jednofázové tlumivky) v suchém provedení o jmenovité hodnotě napětí 10,5kV, kde nejvyšší sdružené trvalé napětí je 12kV. Jmenovitý průchozí výkon je 15 MVA_r na každou fázi. Co se týče magnetického obvodu, jde o vzduchovou tlumivku bez feromagnetického obvodu, která je určena pro venkovní prostředí.

Pro tlumivky tak velkých výkonů se používá konstrukce, ve které jsou samonosné vzduchové cívky, navinuté v podobě několika vrstev, staženy bandážemi do hliníkových nosných konstrukčních křížů či hvězdic. K nosným křížům či hvězdicím jsou připevněny podpěrné izolátory. Na ramena stahovací konstrukce, která slouží také jako přívodní sběrnice, jsou vyvedeny konce vinutí. Pro větší proudové zatížení se používají cívky s větším počtem vrstev, které se mezi sebou propojují paralelně. Vinutí bývá opatřeno speciální povrchovou úpravou nebo je zalito do izolační hmoty. Tlumivky bez feromagnetického obvodu jsou umístěny vedle sebe ve venkovních prostorách rozvodny, kdy můžeme říci, že jsou prostorově náročnější než tlumivky olejové s feromagnetickým jádrem. Suché kompenzační tlumivky jsou propojeny paralelně s terciární stranou autotransformátoru 420/121/10,5kV. [6,7]

Jednou z nevýhod tlumivek bez feromagnetického obvodu je silné magnetické pole, které zasahuje do okolí tlumivky i do svých konstrukčních prvků. Pokud se v blízkosti těchto tlumivek nachází feromagnetické materiály, mohou v nich vzniknout hysterezní ztráty (ztráty způsobené přemagnetováním).[6,7]



Obr. 16 - Kompenzační tlumivka suchá



Obr. 17 - Detail hliníkové nosné konstrukční hvězdice a podpěrných izolátorů suché kompenzační tlumivky

3.1.2 Kompenzační tlumivky olejové (wet type)

Tam, kde nelze použít tlumivky suché, například z důvodu feromagnetických materiálů v blízkosti, je potřeba použít tlumivky v olejovém provedení. Značnou výhodou je úspora

prostoru oproti tlumivkám suchým. Olejové tlumivky se používají tam, kde je potřeba velkých výkonů. U tohoto typu tlumivky, jsou cívky umístěny na feromagnetických obvodech, do kterých je uzavřena převážná část vybuzeného magnetického pole. Magnetické obvody jsou nejčastěji poskládány ze za studena lisovaných plechů se speciální strukturou, které vykazují ve směru válcování velmi dobré magnetické vlastnosti. Pro tyto tlumivky s feromagnetickým jádrem se používá klasické jádrové nebo plášťové provedení. Feromagnetický obvod s navinutými cívkami je umístěn v olejové nádobě, která se hermeticky uzavře a naplní izolačním olejem. Tyto olejové nádoby je nutno zaopatřit zařízením, sloužícímu k účinnému chlazení stroje. Jde zejména o pasivní či aktivní chladiče.[6,7]

Využívaná olejová tlumivka v přenosové soustavě na terciáru autotransformátoru 400/220/34kV se jmenovitou hodnotou napětí 35kV, nejvyšším možným provozovaným napětím 38,5kV, dosahuje 45MVAR jmenovitého výkonu. Jde o třífázovou olejovou kompenzační tlumivku s konstantní reaktancí, bez přidavného zatěžovacího vinutí, zapojená do neuzemněné hvězdy. Tato kompenzační tlumivka je na Obr. 18. [6,7]



Obr. 18 - Třífázová olejová kompenzační tlumivka Siemens

3.2 Připojení kompenzační tlumivky ke zdroji napětí

V prvním případě si ukážeme připojení kompenzační tlumivky ke zdroji napětí. Tady je potřeba si uvědomit, že připojení kompenzační tlumivky, může vést k nesymetrii fázových proudů, což může mít za následek nadměrné elektromagnetické namáhání a vyvolat chybnou činnost ochranných relé. Jestliže chceme těmto jevům předejít, je potřeba připojit každou fázi kompenzační tlumivky ke zdroji napětí na vrcholu fázového napětí, čili v maximu napětí. Pro připojení tří fázové kompenzační tlumivky ke zdroji napětí využijeme vhodnou předdefinovanou strategii řízeného spínání. Seznam předdefinovaných strategií řízeného spínání pro tří fázové kompenzační tlumivky je v [Tabulka 5](#). [5,6,7]

Tabulka 5 : Seznam předdefinovaných strategií pro řízené připojení tří fázových kompenzačních tlumivek ke zdroji napětí [5]

Zapojení vinutí	Návrh jádra	Volba předstihové fáze	L1 (předst. fáze) - operace zapnutí	L2 - operace zapnutí	L3 - operace zapnutí
Yn (hvězda / uzemněný uzel)	Skupina	Náhodná volba	Kladný vrchol fázového napětí předstihové fáze	120° po předstihové fázi	240° po předstihové fázi
	4/5 sloupce jádra				
	3 sloupce jádra	Pevná volba (L1)	Kladný vrchol fázového napětí fáze L1	112° po fázi L1	85° po fázi L1
Y (hvězda / neuzemněný uzel) nebo Δ (trojúhelník)	Skupina	Náhodná volba	Kladný vrchol sdruženého napětí L1-L2		90° po předstihové fázi
	4/5 sloupce jádra				
	3 sloupce jádra	Pevná volba (L1)	Kladný vrchol sdruženého napětí L1-L2		90° po předstihové fázi
Y (hvězda / uzel) se zemním reaktorem	Skupina	Náhodná volba	Kladný vrchol fázového napětí předstihové fáze	ΦC po předstihové fázi	240° po předstihové fázi
	4/5 sloupce jádra				
	3 sloupce jádra	Pevná volba (L1)	Kladný vrchol fázového napětí fáze L1	ΦC po fázi L1	240° po předstihové fázi

V našem případě půjde o připojení suché kompenzační tlumivky ke zdroji napětí v terciáru transformátoru 400/121/10,5kV. Kompenzační tlumivka je tedy suchá, třífázová, v izolované neuzemněné soustavě a zapojená do hvězdy (Zapojení vinutí: hvězda/neuzemněný uzel, čili druhý řádek [Tabulka 5](#)). [5]

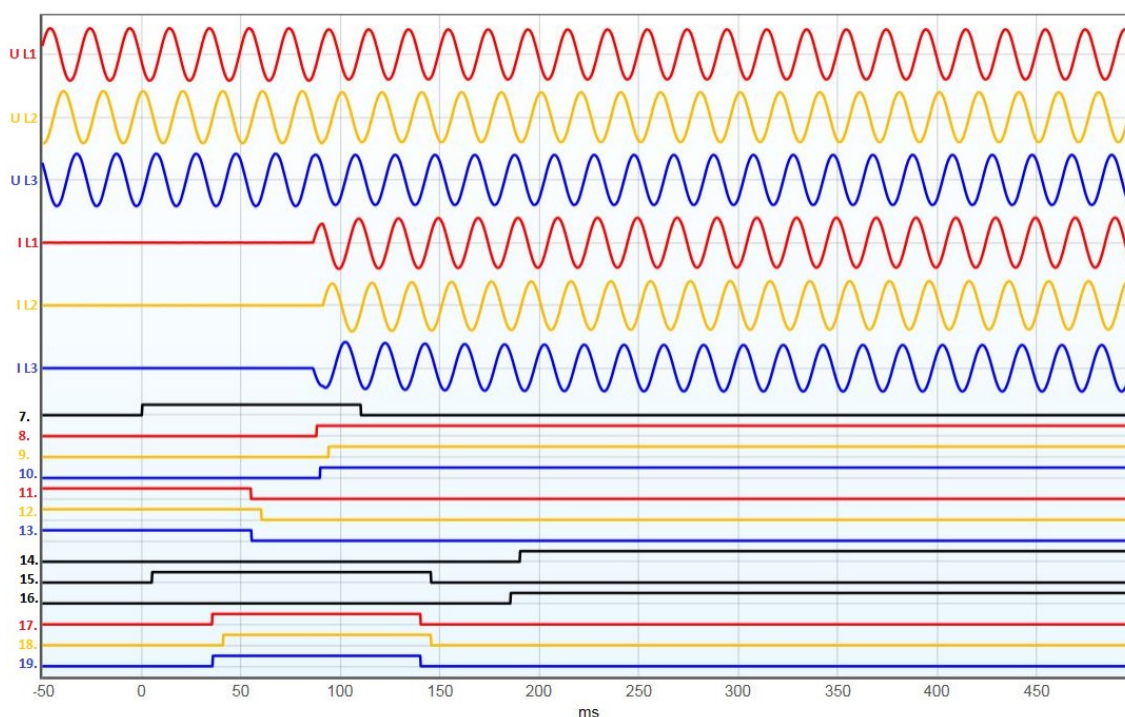
Z tabulky je patrné, že volba předstihové fáze je jasně definovanou pevnou volbou na fázi L1. V momentě operace zapnutí, sepne fáze L1 a fáze L2 v okamžiku, kdy nastane kladný vrchol sdruženého napětí. Třetí fáze L3 provede operaci zapnutí 90° elektrických po sepnutí předstihové fáze. U tlumivek s třemi sloupci jádra, což jsou magneticky spojené fáze a s napětím zátěže, které je navoleno jako referenční signál pro rozpoznání okamžiku zapnutí, je u poslední zapínané fáze blokována adaptivní korekce zapínacích časů.[5]

Výstupem ze zařízení Switchsync PWC600 je grafické zobrazení, které rozeberu v následujících kapitolách

3.2.1 Grafický výstup připojení kompenzační tlumivky ke zdroji napětí ze zařízení Switchsync PWC600

Zde jde o monitorování vypínače, kdy všechny signály, které jsou potřebné pro Switchsync PWC600 jsou především určeny k optimalizaci operací řízeného spínání. Kromě toho slouží a jdou použít pro monitorování a kontrolu průběhů spínacích operací a změn vlastností vypínače, včetně jeho stárnutí (z hlediska počtu operací nebo opotřebení zhášecí komory vypínače). Všechny dostupné kompenzační signály jsou při příjmu spínacího povelu vyhodnoceny z hlediska kompenzačních hodnot. Switchsync PWC600 po vyslání spínacího povelu monitoruje vstupní signály z hlediska stavových změn. Aby bylo možné stanovit skutečné provozní časy vypínače a zohlednit další podmínky, jako jsou například opětovná zapálení oblouku (přeskoky), je vyhodnocena sekvence těchto změnových stavů či událostí. Všechna získaná data jsou zaznamenána v provozním deníku.[5]

Výstupem ze zařízení Switchsync PWC600 je i grafické zobrazení průběhů napětí, proudů, spínacích impulsů a dalších. Tyto průběhy jsou zobrazeny v následujících kapitolách a v nich představím všechny tyto podstatné a zajímavé výstupy z tohoto zařízení.



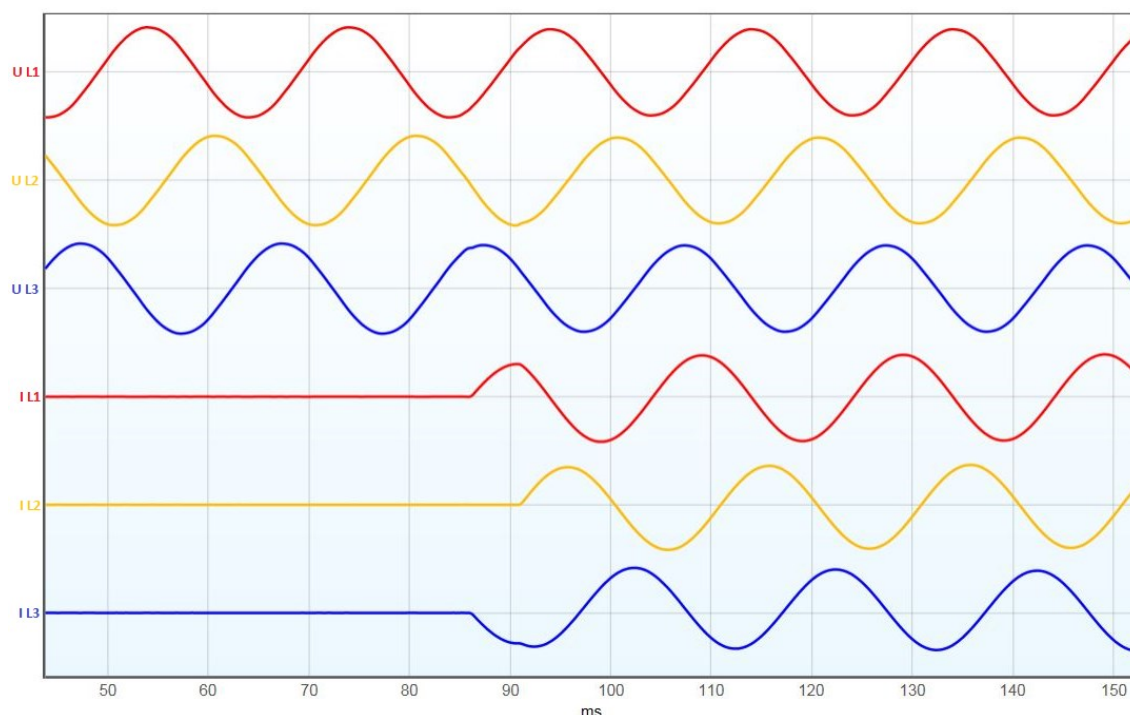
Obr. 19 - Grafický výstup průběhů při zapnutí

Tabulka 6 - Legenda k Obr. 19 a k Obr. 20

Pořadí	X	Označení	Min	Max	Význam
1.		U L1	-9kV	+9kV	Napětí fáze L1
2.		U L2	-9kV	+9kV	Napětí fáze L2
3.		U L3	-9kV	+9kV	Napětí fáze L3
4.		I L1	-3767 A	+3767 A	Proud fáze L1
5.		I L2	-3840 A	+3840 A	Proud fáze L2
6.		I L3	-4039 A	+4039 A	Proud fáze L3
7.		CloseCmdIn	---	---	Operace vypnutí
8.		NO-L1	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L1
9.		NO-L2	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L2
10.		NO-L3	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L3
11.		NC-L1	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L1
12.		NC-L2	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L2
13.		NC-L3	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L3
14.		Blockclose	---	---	Blokování zapínacího povelu
15.		StartPOW	---	---	Proces určení bodu na sinusové vlně signálu
16.		SpChCOBlk	---	---	Úroveň natažení pružiny vypínače
17.		ClsCmdOutL1	---	---	Řízený zapínací povel vyslaný na vypínač fáze L1
18.		ClsCmdOutL1	---	---	Řízený zapínací povel vyslaný na vypínač fáze L2
19.		ClsCmdOutL1	---	---	Řízený zapínací povel vyslaný na vypínač fáze L3

Podle legendy je možno odečíst hlavní aspekty spínacího cyklu. Při vybavení spínacího impulsu v čase 0ms, trvalo zhruba 83ms než došlo k sepnutí 2. a 3. fáze. Tyto 2 fáze sepnuly v okamžiku, kdy mezi nimi byla kladná hodnota sdruženého napětí. Fáze L1 sepnula v okamžiku, kdy od sepnutí fází L2 a L3 uběhl posun 90 stupňů elektrických. Napětí fáze se pohybuje v rozmezí $\pm 9\text{kV}$ a hodnota proudu v závislosti na fázi mezi $\pm 3767\div 4039\text{A}$. Z Grafu je možno odečíst hodnoty jako: operace vypnutí (CloseCmdIn), Stav pomocného pracovního kontaktu (NO-Lx), stav pomocného klidového kontaktu (NC-Lx), Blokování zapínacího povelu (Blockclose), proces určení bodu na sinusové vlně (StartPOW), Úroveň natažení pružiny vypínače (SpCHCoBlk), nebo řízené zapínací povelý vyslané na vypínač jednotlivých fází (ClsCmdOutLx).[5]

Pro lepší představu o stavu napětí a proudů je detail těchto veličin na Obr. 20 a jejich popis v legendě tabulky 6, pořadí 1÷6.



Obr. 20 - Detail průběhů napětí a proudů při zapnutí

Součástí výstupů a vyhodnocení daného sepnutí je i vyhodnocení dalších parametrů potřebných k optimalizaci dalších plánovaných spínání. Ty jsou, jak už bylo řečeno jiné u zapínání i vypínání. V podstatě jde o monitorování elektrických a mechanických funkcí.

3.2.2 Monitorování elektrických funkcí vypínače při zapnutí

Určité parametry jsou vyčleněny ze záznamů napěťových a proudových signálů všech následujících řízených spínacích operací.[5]

Jedním z těchto parametrů je „Elektrická chyba operace“ (Electrical target error) na Obr. 21. Jde o rozdíl mezi aktuálním měřeným elektrickým časem operace a cíleným elektrickým časem operace.[5] Na Obr. 21 je porovnáno posledních devět zapínacích operací. Na obrázku je patrné, že tento rozdíl byl největší při druhém zapnutí a šlo o dobu cca 1ms u všech tří fází.

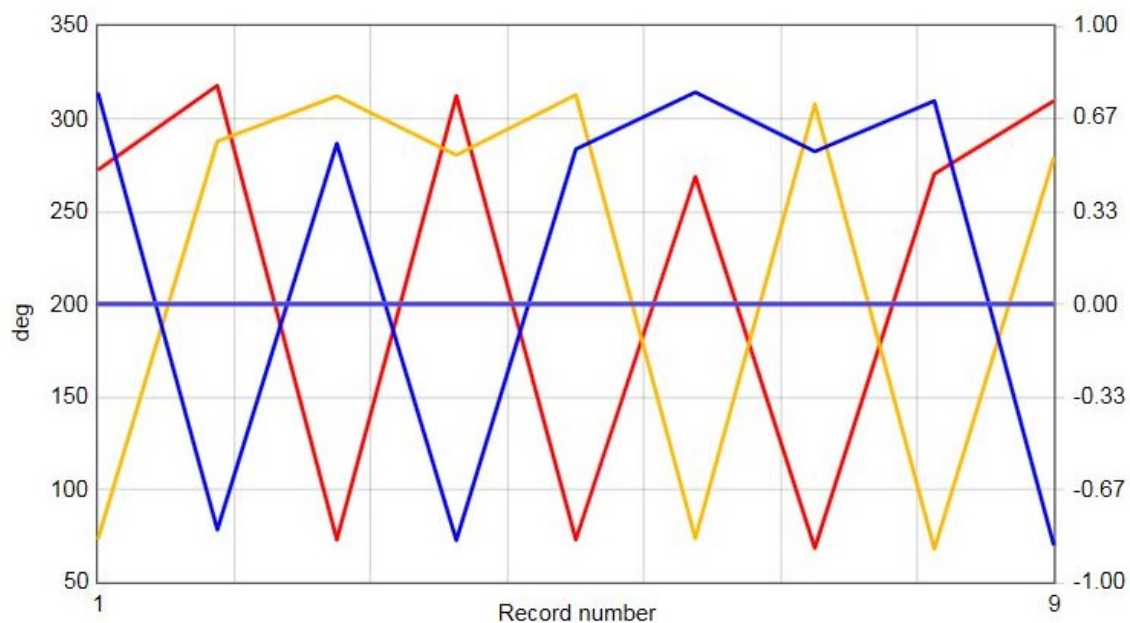


Obr. 21 - Elektrická chyba operace při zapnutí

Tabulka 7 - Legenda k Obr. 21

	EN název	CZ název
	Electrical target error L1	Elektrická chyba operace L1
	Electrical target error L2	Elektrická chyba operace L2
	Electrical target error L3	Elektrická chyba operace L3

Další elektrickou funkcí, nebo spíše jejím parametrem je „Úhel zapínacího proudu“ (Current making angle) na Obr. 22. Tato funkce je platná pouze pro zapínací operace a jde o detekci počátku nárůstu proudu v relativním vztahu ke kladnému průchodu referenčního signálu nulovou hodnotou.[5]



Obr. 22 - Úhel zapínacího proudu a hoření oblouku

Tabulka 8 - Legenda k Obr. 22 - Úhel zapínacího proudu a hoření oblouku

	EN název	CZ název
	Curent making angle L1	Úhel zapínacího proudu L1
	Curent making angle L2	Úhel zapínacího proudu L2
	Curent making angle L3	Úhel zapínacího proudu L3
	Arcing time	Hoření oblouku

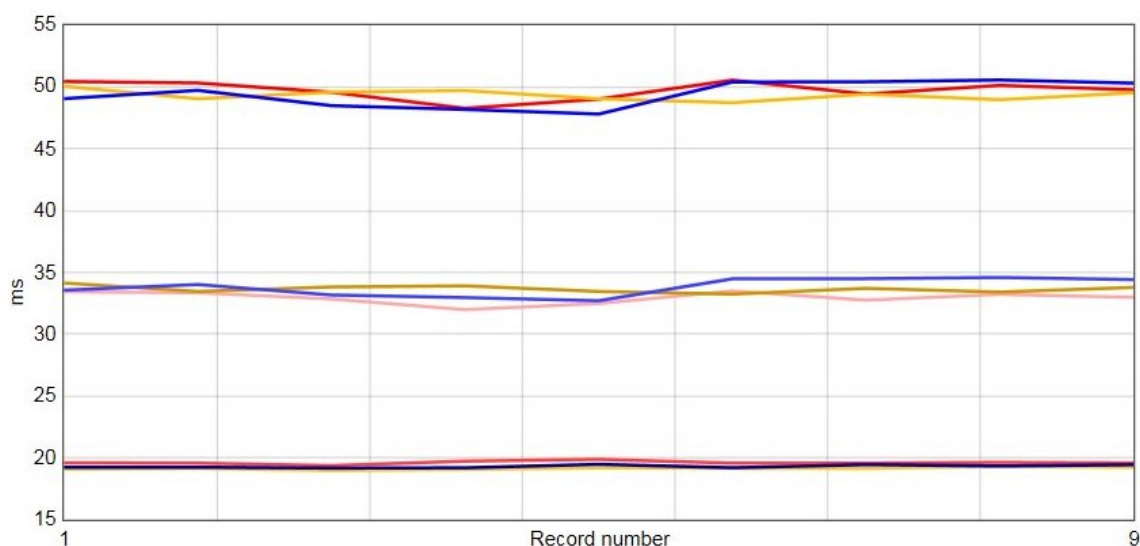
Součástí monitorování elektrických funkcí je i funkce „hoření oblouku“ (Arcing time). Tuto funkci je při zapínací operaci celkem zbytečné zmiňovat, jelikož hodnoty hoření oblouku jsou nulové, což je patrné z Obr. 22.

3.2.3 Monitorování mechanických funkcí vypínače při zapnutí

Určité parametry jsou vypočítány ze zaznamenaných okamžiků přepnutí pomocných kontaktů vypínače u všech následujících spínacích operací. Tyto parametry jsou vypočítány s ohledem na zapojení pracovního kontaktu (NO) a klidového kontaktu (NC) vypínače. [5]

Na Obr. 23 je zobrazeno posledních devět zapínacích cyklů, tří základních parametrů, či raději mechanických funkcí.

- „Mechanický provozní čas“ (Mechanical operating time - nahoře)
- „Počáteční mechanický čas zpoždění“ (Initial mechanical delay time - uprostřed)
- „Mechanický čas pohybu“ (Mechanical moving time – dole)
-



Obr. 23 - Mechanický čas pohybu vypínače (dole), Počáteční mechanický čas zpoždění vypínače (uprostřed), Mechanický provozní čas vypínače (nahoře)

Tabulka 9 - Legenda k Obr. 23

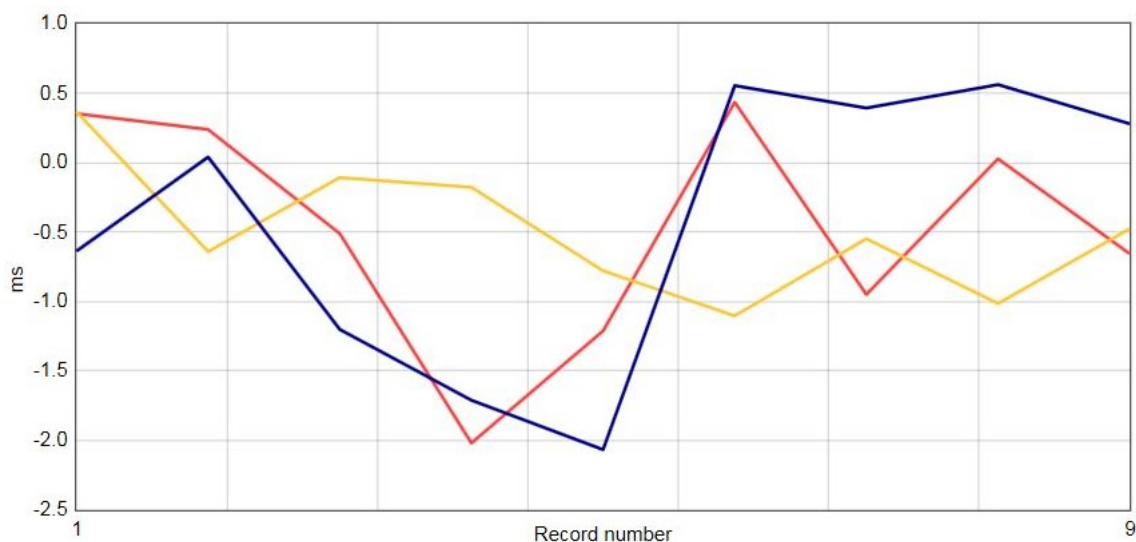
	EN název	CZ název
	Mechanical operating time L1	Mechanická chyba operace L1
	Mechanical operating time L2	Mechanická chyba operace L2
	Mechanical operating time L3	Mechanická chyba operace L3
	Initial mechanical delay time L1	Počáteční mechanický čas zpoždění L1
	Initial mechanical delay time L2	Počáteční mechanický čas zpoždění L2
	Initial mechanical delay time L3	Počáteční mechanický čas zpoždění L3
	Mechanical moving time L1	Mechanický čas pohybu L1
	Mechanical moving time L2	Mechanický čas pohybu L2
	Mechanical moving time L3	Mechanický čas pohybu L3

Mechanický provozní čas vypínače - (Mechanical operating time - nahoře), neboli také čas zapnutí - Jde o dobu od povelu „zapnout“ (Close) k odhadnutému bodu spojení kontaktů vypínače.[5]

Počáteční mechanický čas zpoždění vypínače- (Initial mechanical delay time - uprostřed), jde o dobu od povelu „zapnout“ (Close) k rozepnutí klidového kontaktu (NC).[5]

Mechanický čas pohybu vypínače - (Mechanical moving time - dole), jde o dobu od rozepnutí klidového kontaktu (NC) k sepnutí pracovního kontaktu (NO) vypínače.[5]

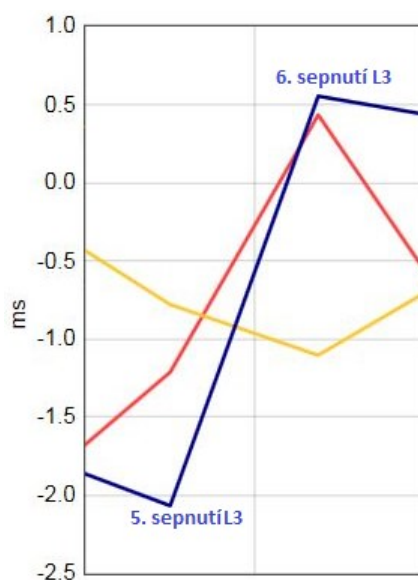
Další mechanickou funkcí je „Mechanická chyba operace“ (Mechanical target error). Zde jde o rozdíl, mezi aktuálním měřeným mechanickým časem operace a cíleným, plánovaným mechanickým časem operace.[5]



Obr. 24 - Mechanická chyba operace zapnutí

Tabulka 10 - Legenda k Obr. 24 - Mechanická chyba operace zapnutí a k Obr. 25 – Detail Obr. 24 - Mechanická chyba operace zapnutí

	EN název	CZ název
	Mechanical target error L1	Mechanická chyba operace L1
	Mechanical target error L2	Mechanická chyba operace L2
	Mechanical target error L3	Mechanická chyba operace L3



Obr. 25 – Detail Obr. 24 - Mechanická chyba operace zapnutí

Zde na Obr. 25 jde krásně vidět proces optimalizace při spínání fází, konkrétně vyznačené fáze L3. Při pátém sepnutí z devíti zobrazených na Obr. 24 je čas mechanické chyby cca -2ms. To znamená, že rozdíl mezi aktuálním měřeným mechanickým časem operace a cíleným, plánovaným mechanickým časem operace je právě těch -2ms, kdy ideální je právě nula. Switchsync PWC600 vyhodnotil celý proces sepnutí a jeho snahou je více idealizovat a optimalizovat proces samotného sepnutí. Při šestém sepnutí jde vidět zlepšení o cca 1,5ms (vůči nule) na hodnotu +0,5ms.

Samozřejmě, že na samotné spínání má vliv spousta faktorů počínaje teploty okolí, tlaku apod., ale na zde uvedeném příkladu se jedná o sepnutí za stejných atmosférických podmínek v rozmezí necelých tří hodin, což nahrává mému tvrzení.

Seznam provozních časů jak elektrických, tak mechanických je v Tabulka 11.

Tabulka 11 - Seznam monitorovaných hodnot při zapnutí

Popis	Hodnoty			Jednotky
	L1	L2	L3	
Elektrická chyba operace	0,54	0,51	0,55	ms
Elektrický provozní čas	50,89	50,43	50,52	
Předpokládaný elektrický provozní čas	50,35	49,92	49,96	
Aktuální úhel zapínacího proudu	309,55	279	69,86	deg
Cílový úhel zapínacího proudu	299,89	269,88	59,89	
Čas hoření oblouku	0	0	0	ms
Cílový čas hoření oblouku	0	0	0	
Mechanická chyba operace	-0,66	-0,48	0,28	
Mechanický provozní čas	49,78	49,54	50,33	
Předpokládaný mechanický provozní čas	50,44	50,02	50,05	
Počáteční mechanický čas zpoždění	19,59	19,22	19,44	
Mechanický čas pohybu	32,99	33,79	34,43	
Hlavní rychlost kontaktu	0	0	0	m/s
Časové zpoždění	35,59	35,59	35,59	ms
Doba nečinnosti	14,59	14,59	14,59	h
Natažení pružin	-	-	-	-
Hnací tlak	-	-	-	-
Teplota	-	-	-	-
DC řídicí napětí	220	220	220	V
Počet operací	8	8	8	-
Kumulované opotřebení přerušovače	8	8	8	-

3.3 Odpojení kompenzační tlumivky od zdroje napětí

Základním problémem, který nastane při odpojení tlumivky od zdroje napětí, je velmi rychlý nárůst zotaveného napětí, jehož následkem je vysoká pravděpodobnost opětovného zapálení oblouku. Aby k opětovnému zapálení oblouku nedošlo, je potřeba vytvořit dostatečnou dielektrickou pevnost mezi kontakty vypínače v okamžiku přerušení proudu. Tuto podmínku splníme řízeným okamžikem mechanického oddělení kontaktů, což nám zajistí nastavení času hoření oblouku bez rizika jeho opětovného zapálení ve vypínači. Tento okamžik se nastavuje již během typových zkoušek vypínače. Při volbě okamžiku operace bereme opět v úvahu z pravidla předdefinovanou strategii, která je doplněna patřičnými údaji. Předdefinované strategie řízeného odpojení kompenzačních tlumivek je v [Tabulka 12](#).

Tabulka 12 - Seznam předdefinovaných strategií pro řízené odpojení tří fázových kompenzačních tlumivek od zdroje napětí [5]

Zapojení vinutí	Návrh jádra	Volba předstihové fáze	L1 (předst. fáze) - operace zapnutí	L2 - operace zapnutí	L3 - operace zapnutí
Yn (hvězda / uzemněný uzel)	Skupina	Náhodná volba	Kladný průchod proudu předstihové fáze nulovou hodnotou	120° po předstihové fázi	60° po předstihové fázi
	4/5 sloupce jádra				
	3 sloupce jádra	Pevná volba (L1)	Kladný průchod proudu fáze L1 nulovou hodnotou	120° po fázi L1	60° po fázi L1
Y (hvězda / neuzemněný uzel) nebo Δ (trojúhelník)	Skupina	Pevná volba (L1)	Kladný průchod proudu fáze L1 nulovou hodnotou	90° po fázi L1	90° po fázi L1
	4/5 sloupce jádra				
	3 sloupce jádra				
Y (hvězda / uzel) se zemním reaktorem	Skupina	Pevná volba (L1)	Kladný průchod proudu fáze L1 nulovou hodnotou	120° po fázi L1	ΦO po fázi L1
	4/5 sloupce jádra				
	3 sloupce jádra				

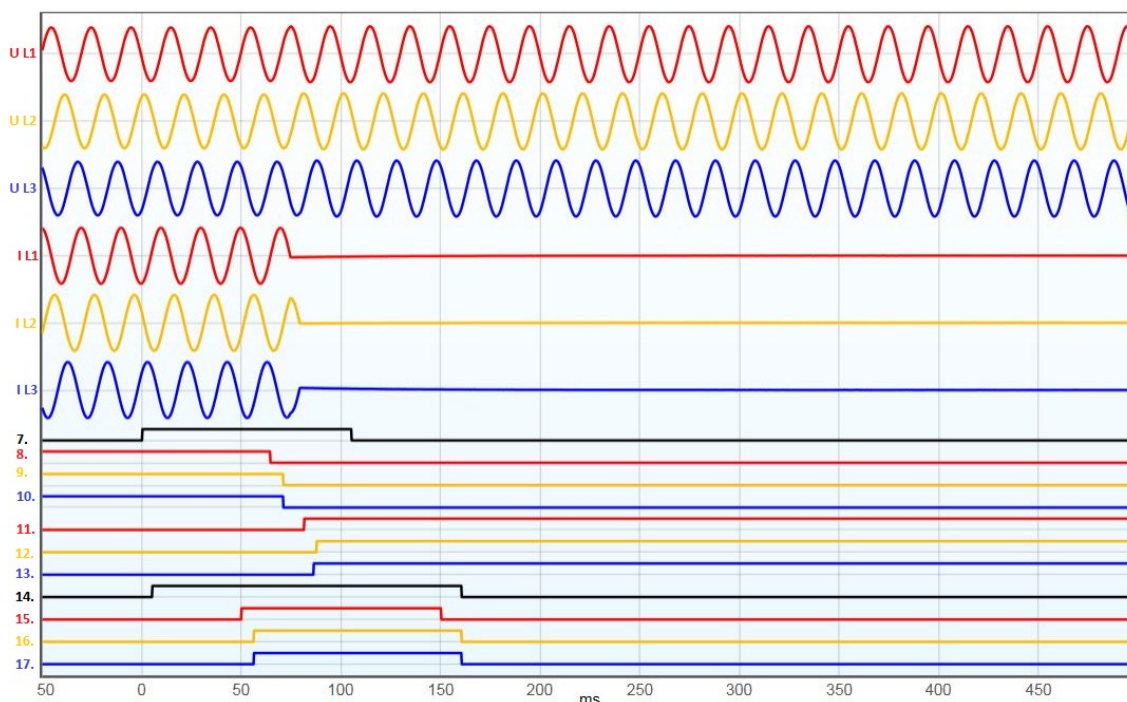
Během typových testů vypínače, jsou určeny časové limitní hodnoty T_{amin} a T_{amax} . Tyto časy jsou minimálním a maximálním časem hoření oblouku při přerušení proudu, bez rizika jeho opětovného zapálení. Závislost těchto časů na dalších faktorech znázorňuje Tabulka 13.

Tabulka 13 - Časy hoření oblouku při odpojení kompenzačních tlumivek od zdroje napětí za předpokladu předstihové fáze L1 [5]

Zapojení vinutí	L1 (předstihová fáze)	L2	L3
Yn (hvězda / uzemněný uzel)	$(T_{amin} + T_{amax}) / 2$	$(T_{amin} + T_{amax}) / 2$	$(T_{amin} + T_{amax}) / 2$
Y (hvězda / neuzemněný uzel) nebo Δ (trojúhelník)	$(1,5 \times T_{amin} + T_{amax}) / 2$	$(0,87 \times T_{amin} + T_{amax}) / 2$	$(0,87 \times T_{amin} + T_{amax}) / 2$
Y (hvězda / uzel) se zemním reaktorem	$((1 + K/4) \times T_{amin} + T_{amax}) / 2$	$(T_{amin} + T_{amax}) / 2$	$((1 + K/4) \times T_{amin} + T_{amax}) / 2$

V mém případě půjde opět tak jako u zapnutí, o příklad třífázové suché kompenzační tlumivky, s pevnou volbou předstihové fáze L1, zapojené do hvězdy v neuzemněné, izolované síti. Z Tabulka 12 je dáno, že předstihová fáze (L1) má vypnout při kladném průchodu proudu nulovou hodnotou. Fáze L2 a L3 90° po předstihové fázi L1.

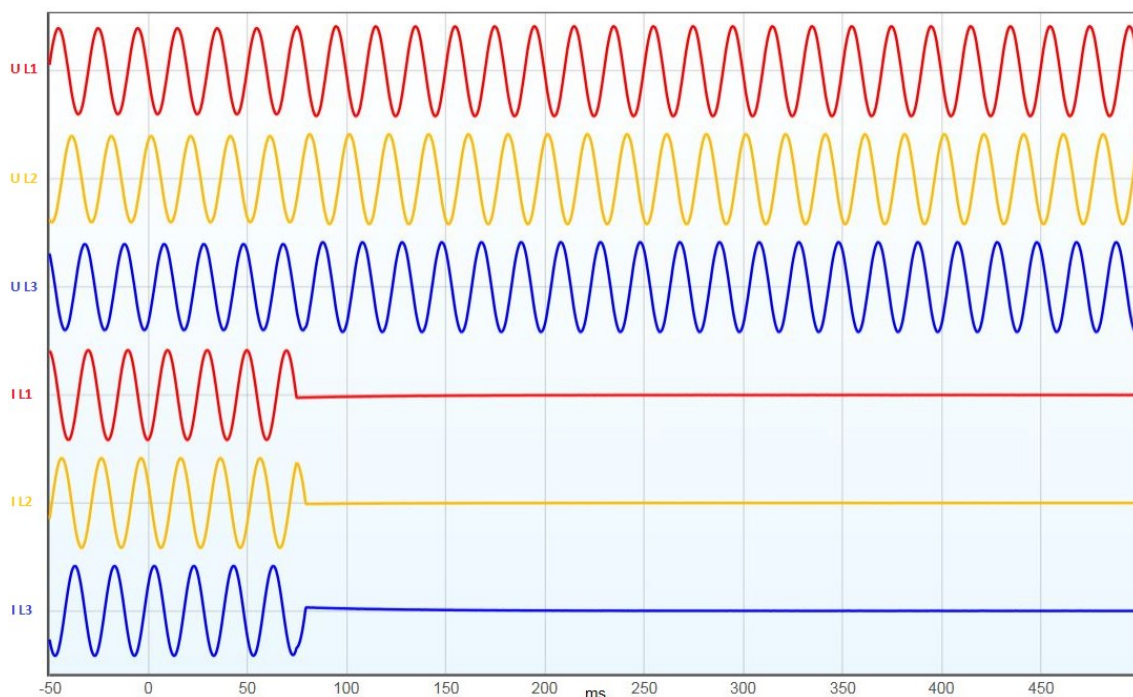
3.3.1 Grafický výstup odpojení kompenzační tlumivky od zdroje napětí ze zařízení Switchsync PWC600



Obr. 26 - Grafický výstup při vypínání

Tabulka 14 - Legenda k Obr. 25 a k Obr. 26

Pořadí	X	Označení	Min	Max	Význam
1.		U L1	-9kV	+9kV	Napětí fáze L1
2.		U L2	-9kV	+9kV	Napětí fáze L2
3.		U L3	-9kV	+9kV	Napětí fáze L3
4.		I L1	-3550 A	+3550 A	Proud fáze L1
5.		I L2	-3509 A	+3509 A	Proud fáze L2
6.		I L3	-3534 A	+3534 A	Proud fáze L3
7.		OpenCmdIn	---	---	Operace vypnutí
8.		NO-L1	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L1
9.		NO-L2	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L2
10.		NO-L3	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L3
11.		NC-L1	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L1
12.		NC-L2	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L2
13.		NC-L3	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L3
14.		StartPOW	---	---	Proces určení bodu na sinusové vlně signálu
15.		OpnCmdOutL1	---	---	Řízený vypínací povel vyslaný na vypínač fáze L1
16.		OpnCmdOutL1	---	---	Řízený vypínací povel vyslaný na vypínač fáze L2
17.		OpnCmdOutL1	---	---	Řízený vypínací povel vyslaný na vypínač fáze L3

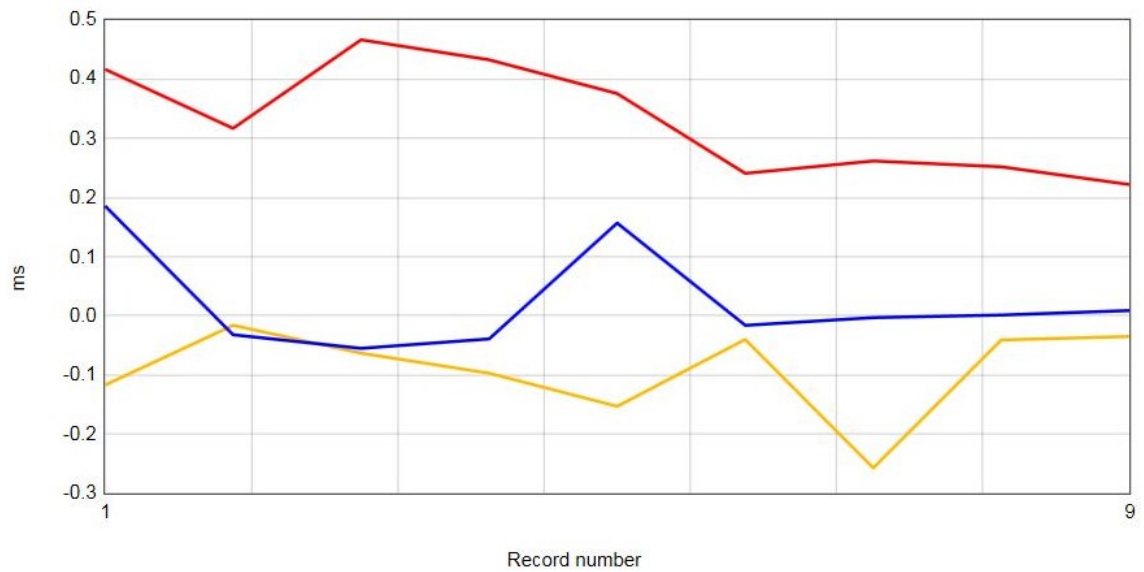


Obr. 27 - Detail průběhů napětí a proudů při vypnutí

Z Obr. 26 a jeho detailu průběhu napětí a proudů na Obr. 27 je krásně vidět vypínací proces. V čase 0ms byl vyslán impuls (operace vypnutí) na vypnutí kompenzační tlumivky. V čase 75ms vypnula předstihová fáze L1. 90° po předstihové fázi L1, v čase 80ms, jde vidět současné vypnutí fází L2 a L3. Stejně jako u zapínání monitorujeme elektrické a mechanické funkce vypínače, které jsou rozebrány v následujících dvou kapitolách.

3.3.2 Monitorování elektrických funkcí vypínače při vypnutí

První monitorovanou elektrickou funkcí je tak jako u vypínání „Elektrická chyba operace“ (Electrical target error) na Obr. 28. Význam je také stejný, čili jde o rozdíl mezi aktuálním měřeným elektrickým časem a cíleným plánovaným časem operace.[5]



Obr. 28 - Elektrická chyba operace při vypnutí

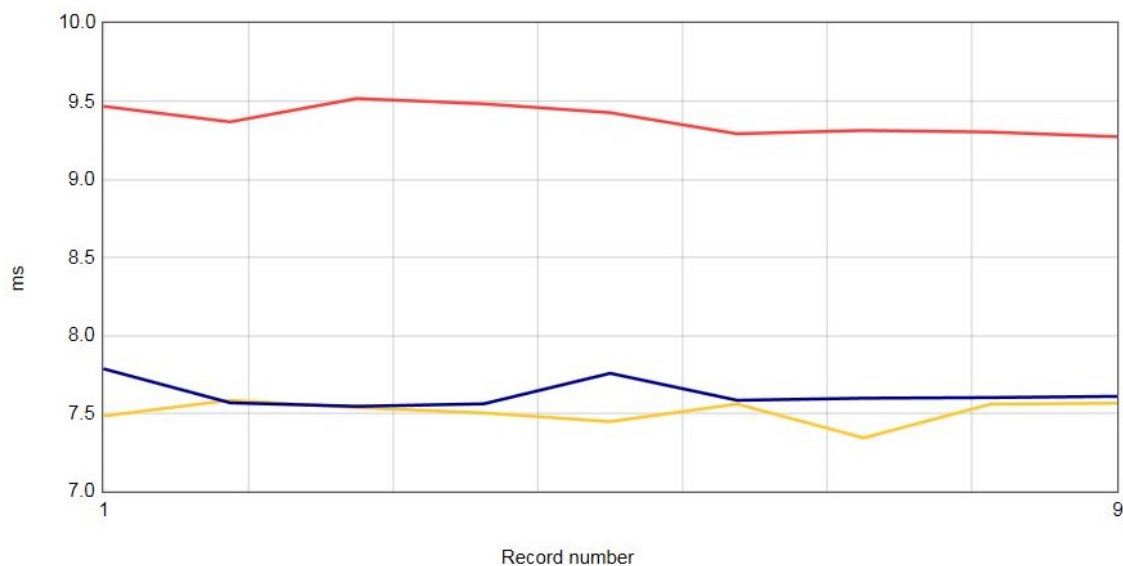
Tabulka 15 - legenda k Obr. 28

	EN název	CZ název
	Electrical target error L1	Elektrická chyba operace L1
	Electrical target error L2	Elektrická chyba operace L2
	Electrical target error L3	Elektrická chyba operace L3

Na Obr. 28 je vidět, že přesnost (rozdíl mezi aktuálním měřeným elektrickým časem a cíleným plánovaným časem) je vskutku výborná. Při posledním devátém zobrazeném sepnutí je tento rozdíl ve fázi L1 0,22ms, ve fázi L2 -0,03ms a ve fázi L3 0,01ms. Hodnoty nejsou odhadnuty, ale jsou součástí výstupů a součástí Tabulka 22.

Dalším monitorovaným elektrickým parametrem je „Čas hoření oblouku“ (Arcing time). Zde jde o dobu od okamžiku odhadnutého mechanického oddělení opalovacích kontaktů do okamžiku definitivního přerušení proudu.

Z Obr. 29 je patrné, že časy hoření oblouku jsou v rámci časového hlediska otázkou milisekund, kdy hoření oblouku ve fázi L1 převyšuje stejný parametr ve fázích L2 a L3 o necelé 2ms na konečných 9,27ms (při posledním sepnutí).



Obr. 29 - Doba hoření oblouku

Tabulka 16 - Legenda k Obr. 29

	EN název	CZ název
	Arcing time L1	Doba hoření oblouku L1
	Arcing time L2	Doba hoření oblouku L2
	Arcing time L3	Doba hoření oblouku L3

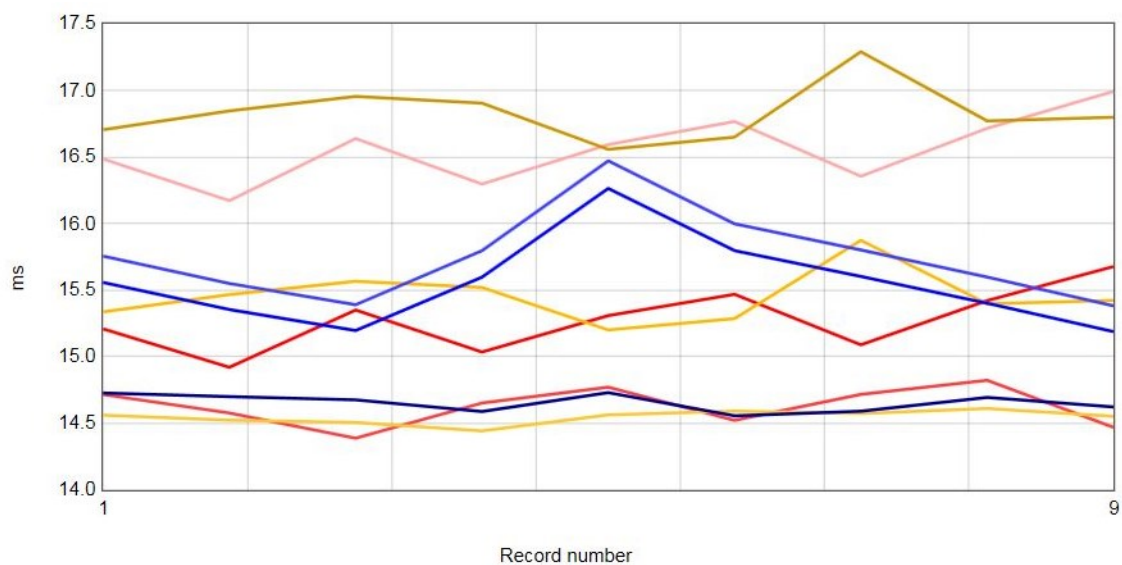
3.3.3 Monitorování mechanických funkcí vypínače při vypnutí

Na Obr. 30 je zobrazeno posledních devět vypínacích cyklů tří základních parametrů, stejně jako u zapínání.

První funkcí je „Mechanický čas pohybu“ (Mechanical moving time - dole). Jde o dobu od rozeznutí klidového kontaktu (NC) k sepnutí pracovního kontaktu (NO) vypínače.[5]

Druhou funkcí je „Počáteční mechanický čas zpoždění“ (Initial mechanical delay time - uprostřed). Jde o dobu od povelu „zapnout“ (Close) k rozeznutí klidového kontaktu (NC). [5]

Třetí funkce je „Mechanický provozní čas“ (Mechanical operating time - nahoře), neboli také čas zapnutí. Jde o dobu od povelu „zapnout“ (Close) k odhadnutému bodu spojení kontaktů vypínače. [5].



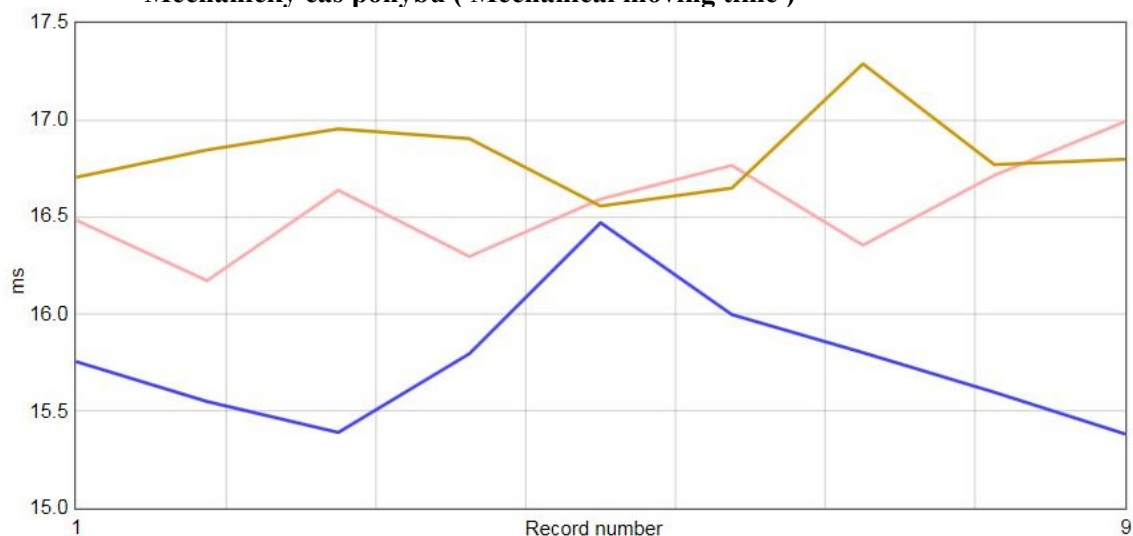
Obr. 30 - Mechanický čas pohybu vypínače (dole), Počáteční mechanický čas zpoždění vypínače (uprostřed), Mechanický provozní čas vypínače (nahore)

Tabulka 17 - Legenda k Obr. 30

	EN název	CZ název
	Mechanical operating time L1	Mechanická chyba operace L1
	Mechanical operating time L2	Mechanická chyba operace L2
	Mechanical operating time L3	Mechanická chyba operace L3
	Initial mechanical delay time L1	Počáteční mechanický čas zpoždění L1
	Initial mechanical delay time L2	Počáteční mechanický čas zpoždění L2
	Initial mechanical delay time L3	Počáteční mechanický čas zpoždění L3
	Mechanical moving time L1	Mechanický čas pohybu L1
	Mechanical moving time L2	Mechanický čas pohybu L2
	Mechanical moving time L3	Mechanický čas pohybu L3

Jelikož je Obr. 30 vcelku nepřehledný, rozdělím níže tyto tři funkce jednotlivě.

- **Mechanický čas pohybu (Mechanical moving time)**

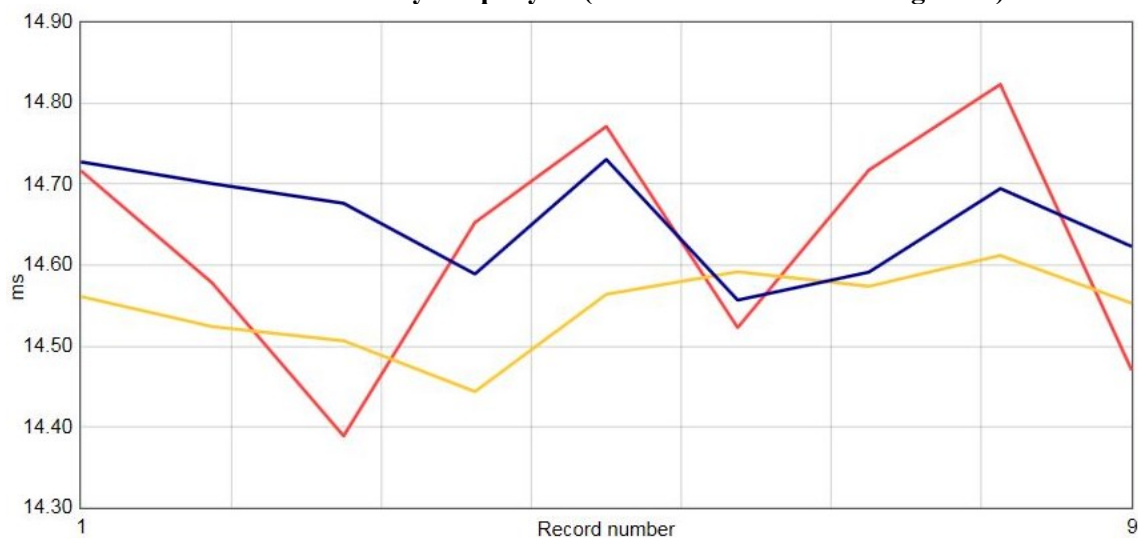


Obr. 31 - Mechanický čas pohybu vypínače

Tabulka 18 - Legenda k Obr. 31

	EN název	CZ název
	Mechanical moving time L1	Mechanický čas pohybu L1
	Mechanical moving time L2	Mechanický čas pohybu L2
	Mechanical moving time L3	Mechanický čas pohybu L3

- **Počáteční mechanický čas pohybu (Initial mechanical moving time)**

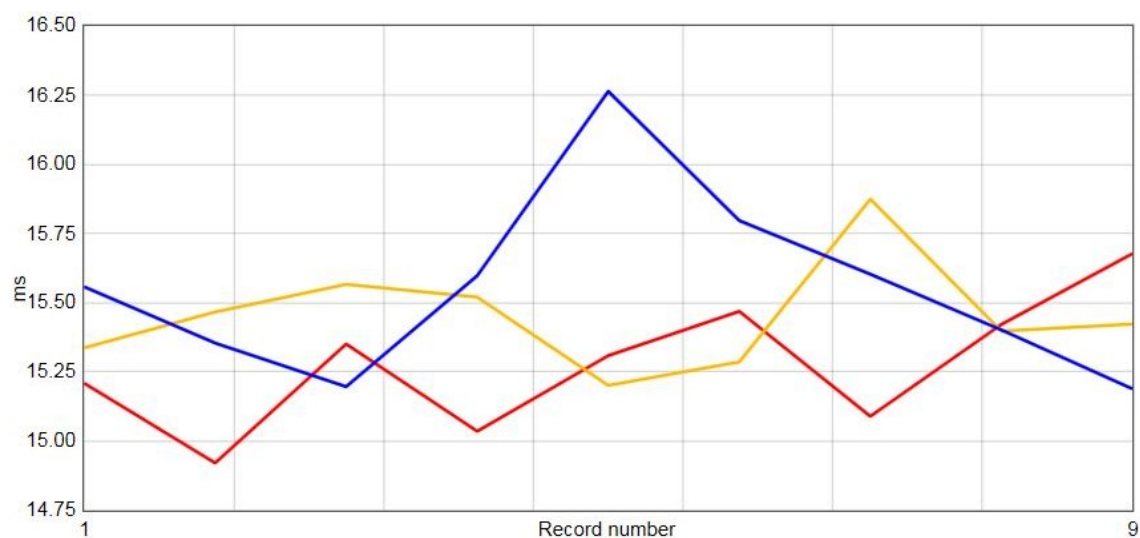


Obr. 32 - Počáteční mechanický čas pohybu

Tabulka 19 - Legenda k Obr. 32

	EN název	CZ název
	Initial mechanical delay time L1	Počáteční mechanický čas zpoždění L1
	Initial mechanical delay time L2	Počáteční mechanický čas zpoždění L2
	Initial mechanical delay time L3	Počáteční mechanický čas zpoždění L3

- **Mechanický provozní čas (Mechanical operating time)**

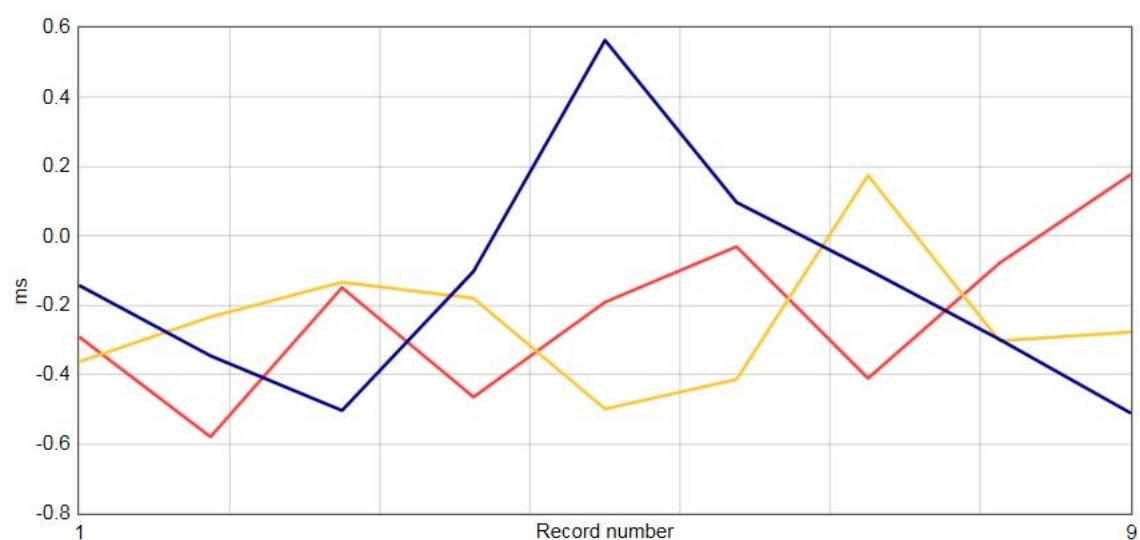


Obr. 33 - Mechanický provozní čas

Tabulka 20 - Legenda k Obr. 33

	EN název	CZ název
	Mechanical operating time L1	Mechanická chyba operace L1
	Mechanical operating time L2	Mechanická chyba operace L2
	Mechanical operating time L3	Mechanická chyba operace L3

Další funkcí je již nedílně známá mechanická chyba operace zapnutí a je na [Obr. 34](#)



Obr. 34 - Mechanická chyba operace zapnutí

Tabulka 21 - Legenda k Obr. 34

	EN název	CZ název
	Mechanical target error L1	Mechanická chyba operace L1
	Mechanical target error L2	Mechanická chyba operace L2
	Mechanical target error L3	Mechanická chyba operace L3

Podobnost grafu mechanické chyby operace zapnutí na Obr. 34 a mechanického provozního času na Obr. 33, stejně jako u vypínání, kde jsem na tuto skutečnost neupozornil, není náhodná.

Na základě mechanické chyby, je v grafu mechanického provozního času jasná souvislost. Jasná souvislost z důvodu toho, že pokud nastane mechanická chyba nenulové hodnoty, což nastane, dá se říci vždy, odrazí se tato skutečnost na konečném času sepnutí, tedy na mechanickém provozním času dané operace.

Seznam provozních časů jak elektrických, tak mechanických je v Tabulka 22.

Tabulka 22 - Seznam monitorovaných hodnot při vypnutí

Popis	Hodnoty			Jednotky
	L1	L2	L3	
Elektrická chyba operace	0,22	-0,03	0,01	ms
Elektrický provozní čas	24,77	23,27	23,31	
Předpokládaný elektrický provozní čas	24,55	23,3	23,3	
Aktuální úhel zapínacího proudu	0	0	0	deg
Cílový úhel zapínacího proudu	0	0	0	
Čas hoření oblouku	8,27	7,57	7,61	ms
Cílový čas hoření oblouku	9,05	7,6	7,6	
Mechanická chyba operace	0,18	-0,28	-0,51	
Mechanický provozní čas	15,68	15,42	15,19	
Předpokládaný mechanický provozní čas	15,5	15,7	15,7	
Počáteční mechanický čas zpoždění	14,47	14,55	14,62	
Mechanický čas pohybu	16,99	16,8	15,38	m/s
Hlavní rychlost kontaktu	0	0	0	
Časové zpoždění	51	51	51	ms
Doba nečinnosti	7,06	7,06	7,06	h
Natažení pružin	-	-	-	-
Hnací tlak	-	-	-	-
Teplota	-	-	-	-
DC řídicí napětí	220	220	220	V
Počet operací	9	9	9	-
Kumulované opotřebení přerušovače	9	9	9	-

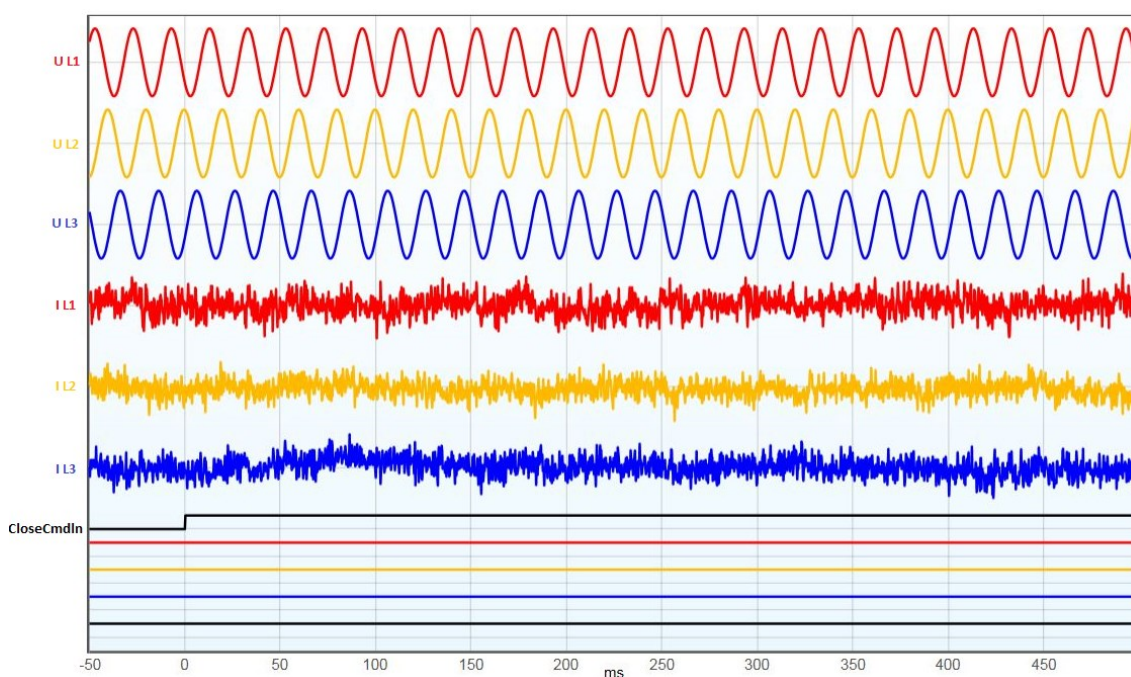
3.4 Simulace neúspěšného zapnutí kompenzační tlumivky

Pro zajímavost uvedu opravdu velmi jednoduchý příklad simulace neúspěšné operace zapnutí.

Při funkčních zkouškách zařízení, součástí uvádění zařízení pod napětí jsem měl možnost být účastníkem simulace neúspěšného zapnutí. Nejde o nic jiného, než o vyslání operace zapnutí na vypínač, který je zajištěn takovým způsobem, aby jeho pohon na tuto operaci nereagoval. Grafický výstup tohoto popisu je na [Obr. 35](#).

Zařízením určeným k simulaci byla třífázová olejová tlumivka známá z [Obr. 18](#).

Průběhy proudů na [Obr. 35](#) sice vypadají nestandardně, ale podle výstupu jde o indukovaný proud v hodnotě $\pm 3\text{ A}$. Hodnota napětí fáze je $\pm 27\text{ kV}$. Na tomtéž obrázku jde vidět v čase 0ms zapínací impuls (CloseCmdIn), který je v rámci simulace neúspěšného zapnutí, úspěšně nevykonán. Takže smyslem celé této simulace bylo, aby se zapnutí nepovedlo, což se při zkouškách prokázalo.



Obr. 35 - Grafický výstup neúspěšné operace zapnutí

ZÁVĚR

Optimalizace řízeného spínání, obzvláště u spínání kompenzačních tlumivek dále v koprodukcii s kompenzací přenosové soustavy je tématem velmi rozsáhlým technicky velmi zajímavým. Celosvětově jde jistým směrem o trend, kdy země namátkou jako Kanada, Brazílie a další, se tímto tématem optimalizace řízeného spínání zabývají a sbírají velmi cenné zkušenosti. I my v České republice se v této problematice v mnohém ještě učíme, učíme se využívat zařízení sloužící k tomuto druhu spínání, zařízení jako je Switchsync PWC600 od firmy ABB, nebo PSD02,03 od firmy Siemens. Obrovským aspektem a faktorem, který musíme brát v úvahu je stále lidská obsluha tohoto zařízení. Týmy specialistů údržby silového zařízení, specialistů údržby sekundární techniky a ochran včetně spolupráce specialistů z technické politiky a provozních činností (a dalších) se podílí na zprovoznění, údržbě, funkčnosti a vyhodnocení výstupů ze zařízení jako je právě Switchsync PWC600 a další. Jde jistým směrem o IED (intelligent electronic device), která na základě výstupů spínání se má „učit“ spínat lépe, účinněji, porovnávat jednotlivá spínání, ale stále bez této obsluhy by její funkčnost nemohla být dlouhodobě plně zajištěna. Hlavní podstatou tohoto zařízení a optimalizace řízeného spínání je minimalizovat zatěžování vypínače (zapínacích proudů, zotaveného napětí) na takovou míru, abychom minimalizovali pravděpodobnost zbytečně velkého opotřebení a elektrického namáhání vypínače, tak jak tomu bylo dříve. Obecně jde o minimalizaci následků přechodových jevů. Výsledkem jsou delší servisní intervaly vypínače, větší životnost a s tím i spojená úspora nákladů na provoz tohoto zařízení. Právě i z hlediska montáže zařízení k optimalizaci řízeného spínání se důsledkem zotaveného napětí začaly používat vypínače se jmenovitou hodnotou napětí 72,5kV v terciérech transformátorů o napětíové hladině 12kV, což je opět krok ke snížení elektrického namáhání vypínače a jeho větší životnosti.

Smyslem této práce bylo přiblížit problematiku optimalizace spínání a seznámit se, se zařízením Switchsync PWC600. Snažil jsem se popsat základní principy, funkce, strategie a mnoho jiných faktorů. Z toho všeho jsem vypsál a popsal jen část schopností a možností tohoto zařízení, kterou jsem považoval za důležitou právě k pochopení, proč toto zařízení má svůj smysl a svou budoucnost. Dále k čemu slouží a v čem jsou jeho hlavní výhody s ohledem na kompenzační tlumivky. Výstupem je velké množství hodnot, které jsme schopni analyzovat a přizpůsobit jak další operace spínání, tak instalaci tohoto zařízení i na jiné prvky.

Jedinou věcí, která není na grafickém výstupu ze Switchsync zřetelná, jsou průběhy zotaveného napětí, které nejsou součástí, proto nejsou v této práci blíže popsány. Dále jako nevýhodu uživatele vidím, že k zařízení Switchsync PWC600 nelze připojit jiný vypínač, než vypínač ABB, protože všechny přednastavené a volitelné strategie jsou pouze na vypínače ABB. Uvádím sice tuto nevýhodu, ale je to záležitost výrobce udržet si jisté know-how a výhody tohoto zařízení převyšují snad jen mnou vnímané dvě menší nevýhody.

Nutno podotknout, že použití optimalizace řízeného spínání pomocí Switchsync PWC600 je jen pro plánované spínání. V případě nutnosti vybavení ochrany je vypnutí okamžité, bez jakékoliv optimalizace.

V úvodu jsem položil otázku „Optimalizace řízeného spínání - jde opravdu o podstatnou a potřebnou věc? “. Mým verdiktem je ano. Ano, jde o podstatnou, velmi zajímavou a potřebnou věc. Z hlediska menšího namáhání vypínače, hlídání opotřebení zhášecí komory a životnosti určitě. Z hlediska analýzy spínání také ano. Pokud se budeme bavit o kompenzaci přenosové soustavy právě pomocí optimalizace řízeného spínání kompenzačních tlumivek, tak bezesporu třetí ano v řadě. Kompenzace přenosové a distribuční soustavy je již celkem naléhavým tématem a vynakládají se nemalé finance k doplnění kompenzačních prostředků v celé České republice, které nám pomohou zajistit stabilní a spolehlivou elektrickou energii požadované kvality s předpokladem optimálních nákladů na provoz.

Kvalita elektrické energie, stabilita přenosové soustavy a zajištění maximální možné spolehlivosti zařízení jsou tím pravým a ne jediným důvodem, proč optimalizovat řízené spínání.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] „Ing. Otto HAVELKA CSC., a kolektiv. Elektrické přístroje. Praha: SNTL, 1985. DT 621.31(075.8).“
- [2] „BUL B. K. A KOLEKTIV a Doc. Ing. Vladimír SUCHÁNEK, CSc. Elektrické přístroje: Základy teorie. Praha: SNTL, 1977. DT. 621.316.54. 621.316.925. 621.316.72.“
- [3] „MORAVEC, Jan. Elektrický oblouk. [Http://oenergetice.cz](http://oenergetice.cz) [online]. 2017, 8.4.2017 [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektricky-oblouk/>“
- [4] „ČSN 333030. Stanovení průběhu zotaveného napětí v sítích střídavého napětí. S účinností od 1.11.1987. 1986.“
- [5] „ABB. Switchsync PWC600: User manual. Revision: A, Product version: 1.0. Sweden: ABB, 2015. ISBN Document ID: 1MRK 511 346-UEN.“
- [6] *TLUMIVKY V SILNOPROUDÉ ELEKTROTECHNICE – ČÁST 1: ZÁKLADNÍ DRUHY KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ TLUMIVEK* [online]. Praha: ČVUT Praha, 2009, **2009**(2) [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/zakladni-druhy-konstrukcniho-usporadani-tlumivek/>
- [7] *Tlumivky v silnoprouté elektrotechnice (Část 2): Často používané aplikace tlumivek v silnoprouté elektrotechnice* [online]. Praha: ČVUT Praha, 2010, **2010**(9) [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/teoreticka-elektrotechnika/0/casto-pouzivane-aplikace-tlumivek-v-silnoproute-elektrotechnice/>
- [8] Kontakty: Elektrický oblouk. *Slideplayer* [online]. 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2450765/>